ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

**ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ**

4 2012 (141)

## СОДЕРЖАНИЕ

*Ресурс машин и конструкций*

**Черепанов А.П., Черепанов Е.А.** Прогнозирование ресурса машин на основе данных по их техническому состоянию . . . 3

*Экономика и организация сборочного производства*

**Данилов Е.А.** Системы поддержки принятия решения в промышленных системах мониторинга . . . 10

*Технологичность конструкции*

**Кашуба Л.А.** Алгоритмы моделирования геометрии реальной детали . . . 13

*Современные технологии сборки*

**Чернявский С.Н., Безрукова Т.В., Кристаль М.Г.** Устройство для ротационной сборки роликовых подшипников . . . 22

*Технологическая оснастка для сборки*

**Житников Ю.З., Житникова И.В.** Ручные одношпиндельные гайковерты на основе муфт предельного момента повышенной точности осевых сил затяжки . . . 25

*Сборочно-сварочные работы. Пайка*

**Карабанов В.В., Бохоров И.О.** Реактивные процессы при пайке . . . 30

*В помощь конструктору, технологу*

**Матросова Ю.Н.** Программное обеспечение для автоматизированного проектирования типовых технологических процессов деталей "втулка", "вал" . . . 40

*Информация*

**Иванов А.Н.** MITEX–2011 . . . 45

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу “Роспечать” – **79748**, Объединенному каталогу “Пресса России” – **84967**, каталогу "Почта России" – **60257**) или непосредственно в издательстве
*Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.*
E-mail: sborka@mashin.ru
*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.*
*За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.*

**Председатель редакционного совета**
Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

**Редакционный совет**

**МОСКВА**
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор)
А.А. ГУСЕВ
М.В. ВАРТАНОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ
И.Н. ЗИНИНА
Ю.Л. ИВАНОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.И. КУМЕНКО
А.В. МЕДАРЬ
Е.А. МИКРИН
В.В. ПОРОШИН
Б.В. ШАНДРОВ
А.А. ШАТИЛОВ
А.Г. ХОЛОДКОВА
Г.А. ЯРКОВ

**Региональные редсоветы**

**БЕЛГОРОД**
Н.А. ПЕЛИПЕНКО
**БРЯНСК**
О.А. ГОРЛЕНКО
**ВЛАДИВОСТОК**
Ю.Н. КУЛЬЧИН
А.А. СУПОНЯ
В.М. КОРНИЕНКО
**ВОЛГОГРАД**
В.Г. КАРАБАНЬ
М.Г. КРИСТАЛЬ
В.И. ЛЫСАК
В.М. ТРУХАНОВ
**ИЖЕВСК**
И.В. АБРАМОВ
Б.А. ЯКИМОВИЧ
В.Г. ОСЕТРОВ
**КАЗАНЬ**
Р.И. АДГАМОВ
**КОВРОВ**
Ю.З. ЖИТНИКОВ
**КОЛОМНА**
Ю.Д. АМИРОВ
**КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ**
Б.Н. МАРЬИН
В.И. ШПОРТ
А.М. ШПИЛЕВ
**НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ**
С.В. ДМИТРИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ
**НИЖНИЙ НОВГОРОД**
С.В. ГОЛУБЕВ
**ОМСК**
В.Н. КОСТЮКОВ
**ОРЕЛ**
Ю.С. СТЕПАНОВ
Г.А. ХАРЛАМОВ
**ОРЕНБУРГ**
А.Н. ПОЛЯКОВ
А.И. СЕРДЮК
А.П. ФОТ
**РЫБИНСК**
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.В. НЕПОМИЛУЕВ
А.Н. СЕМЕНОВ
**САМАРА**
М.А. ЕВДОКИМОВ
Ю.А. ВАШУКОВ
Г.А. КУЛАКОВ
В.А. НИКОЛАЕВ
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**
В.Ф. КУЗЬМИН
Е.В. ШАЛОБАЕВ
**ТОЛЬЯТТИ**
А.И. РЫЖКОВ
Б.Ф. ХАЗОВ
**ТУЛА**
В.В. ПРЕЙС
**ХАБАРОВСК**
В.А. ЛАШКО

**Украина**
**КИЕВ**
А.С. ЗЕНКИН
В.А. МАТВИЕНКО
**ДОНЕЦК**
А.Н. МИХАЙЛОВ
**СЕВАСТОПОЛЬ**
Е.Л. ПЕРВУХИНА

**Беларусь**
**МИНСК**
В.Л. БАСИНЮК
М.Л. ХЕЙФЕЦ
**ГОМЕЛЬ**
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ

**Ответственные за подготовку и выпуск номера:**
Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2012

THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

# ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

*THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION*

4 2012 (141)

## CONTENTS

*Service life of machinery and constructions*

**Cherepanov A.P., Cherepanov E.A.** Predicting resource machines based on their technical condition . . . 3

*Economy and the organization of assembly*

**Danilov E.A.** Systems of support of decision-making in industrial systems of monitoring . . . 10

*Manufacturability of a construction*

**Kashuba L.A.** Simulation algorithm geometry of the real details . . . 13

*Modern technologies in assembly*

**Cherniavsky S.N., Bezrukova T.V., Kristal M.G.** A device for roller bearings the rotating assembly . . . 22

*Technological equipment for assembly*

**Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikova I.V.** Manual single-spindle screwdrivers on a basis clutch the limiting moment of the raised accuracy of axial forces of an inhaling . . . 25

*Assembly welding works. Solder*

**Karabanov V.V., Bohorov I.O.** Reactive processes for soldering . . . 30

*Industrial and design engineer's aid*

**Matrossova Yu.N.** Sofware for automated design of standard technological process for making details "hub", "shaft" . . . 40

*Information*

**Ivanov A.N.** MITEX-2011 . . . 45

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency – **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" – **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" – **60257**) or directly in editorial of the journal.
*Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.*
*http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru*
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building"
107076, Moscow, Stromynsky per. 4
*The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.*
*Advertisers are responsible for the content of their advertisements.*

**Chair of Editorial Advisory Board –**
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

**Editors**

**MOSCOW**
A.S. VASIL'EV (Chief editor)
M.V. VARTANOV
A.M. DALSKY
A.A. GUSEV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
V.V. POROSHIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA
G.A. YARKOV

**Regional editors**

**BELGOROD**
N.A. PELIPENKO
**BRIANSK**
O.A. GORLENKO
**VLADIVOSTOK**
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
V.M. KORNIENKO
**VOLGOGRAD**
M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
**IZHEVSK**
I.V. ABRAMOV
B.A. YAKIMOVICH
V.G. OSETROV
**KAZAN**
R.I. ADGAMOV
**KOVROV**
Yu.Z. ZHITNIKOV
**KOLOMNA**
Yu.D. AMIROV
**KOMSOMOLSK-ON-AMUR**
B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV
**NABEREZHNYE CHELNY**
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
**NIZHNY NOVGOROD**
S.V. GOLUBEV
**OMSK**
V.N. KOSTIUKOV
**OREL**
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
**ORENBURG**
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
**RYBINSK**
V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
**SAMARA**
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
G.A. KULAKOV
V.A. NIKOLAEV
**ST.-PETERSBURG**
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
**TULA**
V.V. PREYS
**TOLIATI**
B.F. KHAZOV
A.I. RYZHKOV
**KHABAROVSK**
V.A. LASHKO

**Ukraine**
**KIEV**
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
**DONETSK**
A.N. MIKHAILOV
**SEVASTOPOL**
E.L. PERVUKHINA

**Belarus**
**MINSK**
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ
**GOMEL**
V.E. STARZHINSKI

**Executive editors of current issue:**
Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000 Free price

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2012

УДК 620.171:621.039.548.58

**А.П. Черепанов,** *канд. техн. наук (Научно-диагностический центр ОАО "Ангарская нефтехимическая компания"),* **Е.А. Черепанов,** *аспирант (Ангарская государственная техническая академия)*
*E-mail: cherepanovap@anhk.rosneft.ru*

# Прогнозирование ресурса машин на основе данных по их техническому состоянию

*Предложены зависимости для прогнозирования полного, расчетного и остаточного ресурса от момента диагностирования до перехода в предельное состояние при снижении запасов прочности, с учетом эффективности технического диагностирования, и степени ответственности машины.*

*Offered according to project a full, current and remaining life from the moment of diagnosis until the transition to the limit state with a decrease in safety margins, taking into account the effectiveness of technical diagnosis, and extent of liability machine.*

**Ключевые слова:** машина, техническое диагностирование, остаточный ресурс, запас прочности, техническое состояние.

**Keywords:** machine, technical diagnosis, residual life, factor of safety, technical condition.

Обеспечение надежности и безопасности машин с использованием результатов оценки технического состояния средствами неразрушающего контроля получило широкое признание в технике. Порядок продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах утвержден Минприроды России № 195 от 30.06.2009.

Современные методы прогнозирования ресурса машин основаны на комплексных показателях, которые учитывают износ, усталость, старение материалов, вероятную степень риска, характеризующую ответственность машин повышенной опасности при отказе [3]. Действующие указания и правила расчета сроков службы [5, 6] предусматривают обеспечение прочности и износостойкости при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации машин, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов. Методы прогнозирования остаточного ресурса, основанные на стандартизованных нормах расчета [7], предусматривают определение и использование фактических (прямых) параметров технического состояния, для которых установлены предельные значения ресурса составной части машины. Прогнозирование ресурса машины от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние возможно по критериям предельного состояния, определенным расчетным путем при проектировании или ресурсными испытаниями опытных образцов, а также по фактическим параметрам технического состояния, определенным на заводе-изготовителе путем первоначального технического контроля. Мониторинг критериев и параметров технического состояния, проводимый периодически в процессе эксплуатации [5], обеспечивает надежность машины за пределами ее расчетного ресурса.

Прогнозирование ресурса узлов, деталей и элементов машин, отказы которых вызывают процессы накопления повреждений, рекомендуется проводить по косвенным параметрам при одновременном выполнении условий, когда известны физические процессы, приводящие к ресурсным отказам, а также математические модели изменения прямых (структурных) и косвенных (диагностических) параметров, в частности:

- если для каждого прямого параметра установлены предельные значения, достижение которых определяет величину ресурса;
- в процессе наблюдения за изменением технического состояния имеется возможность фиксации параметров, отражающих индивидуальные особенности машины;
- имеется информация о функциональных или регрессионных соотношениях между прямыми и косвенными параметрами;
- известна монотонная и непрерывная зависимость между математическими ожиданиями прямых и косвенных параметров.

При этом учитываются погрешности измерения параметров, погрешности, связанные со случайной природой физических процессов развития отказов, а также методические погрешности определения прямых параметров технического состояния по значениям косвенных. Наиболее доступным для практического использования является метод оценки остаточ-

ного ресурса, основанный на прогнозировании процессов изнашивания и других монотонных процессов ухудшения технического состояния узлов и агрегатов машин, основанный на степенной аппроксимации изменения параметров технического состояния.

Однако в работе [7] отмечается, что использование приведенных соотношений затруднено необходимостью большого объема исследований. Поэтому при малом сроке эксплуатации (относительно нормативного) и незначительной поврежденности прогнозирование ресурса рекомендовано по информации о нагруженности узлов и деталей машины. Преимуществом такого подхода является его меньшая трудоемкость. При сроке эксплуатации, близком к нормативному, или значительной поврежденности деталей и узлов дополнительно исследуют степень их поврежденности, что дает более точный прогноз и возможность выявления дополнительного резерва ресурса. В зависимости от требуемой достоверности прогноза ресурса предложен упрощенный подход, основанный на детерминистических оценках показателей, при котором отклонения контролируемых параметров относят к погрешностям методов контроля и случайным помехам.

При прогнозировании остаточного ресурса показатели в расчетах учитываются с помощью коэффициентов запасов. Уточненный подход основан на вероятностных оценках прогнозирования ресурса, при котором колебания наблюдаемых параметров используют в качестве дополнительной информации, что позволяет повысить достоверность прогнозирования ресурса, однако при этом возрастает их количество. В современной практике проектирования запасы прочности, износостойкости и расчетные режимы нагружения принимаются больше фактических, что обеспечивает безопасную эксплуатацию за пределами расчетного срока службы машин. В то же время избыточность запасов прочности, заложенных при проектировании, ведет к завышению материалоемкости и трудоемкости изготовления, себестоимости и соответственно к удорожанию машин, а их недостаточность приводит к выходу из строя отдельных узлов и деталей, имеющих заниженные запасы прочности, что снижает надежность всей машины из-за неравнопрочности, принятой при проектировании.

Традиционно в расчетах прочности, выполняемых при проектировании, завершающим этапом является вывод, что $\sigma \le [\sigma]$ и условия прочности выполняются, напряжения не превышают допускаемые, что является лишь констатацией факта, но не дает представления о количественном и качественном влиянии запасов прочности на ресурс, и о равнопрочности узлов и деталей машины.

Основы определения ресурса при статических нагрузках, коррозионном и эрозионном изнашивании в условиях ползучести, замедленного хрупкого и циклического разрушения деталей разработаны Н.А. Махутовым [3]. В качестве показателей технического состояния принята многокритериальная система оценки ресурса по нормируемым запасам прочности напряжений, деформаций, числа циклов, времени и температур, которая выражается зависимостью:

$$\{\sigma^{э}, e^{э}, K_{le}^{э}, N^{э}, \tau^{э}, t^{э}\} = \\ = f(P^{э}, t^{э}, l^{э}) \le \left\{\frac{\sigma_c}{n_\sigma}, \frac{e_c}{n_e}, \frac{N_c}{n_N}, \frac{\tau_c}{n_\tau}, \frac{t_c}{n_t}\right\},$$

где $\sigma$ – напряжения; $e$ – деформации; $K_{le}^{э}$ – коэффициенты концентрации; $N$ – число циклов; $\tau$ – эксплуатационный ресурс; $t$ – длительность эксплуатации в зависимости от давления $P$, температуры $t$, размеров дефектов $l$. Параметры с индексом "э" представлены как эксплуатационные, с индексом "$c$" – как критические; $n_\sigma$, $n_e$, $n_N$, $n_\tau$, $n_t$ – нормируемые запасы соответственно по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температурам.

В работах [4, 8] предложен метод определения запасов прочности для различных критериев предельного состояния из отношения предельных нагрузок, деформаций и числа циклов нагружения к эксплуатационным нагрузкам, деформациям, числу циклов нагружения. Однако до настоящего времени при оценке ресурса не учитывается степень износа, вызванная снижением запасов прочности узлов и деталей с момента изготовления до достижения предельного состояния. Для определения полного, расчетного и остаточного ресурсов от момента диагностирования до перехода в предельное состояние, как это предусмотрено ГОСТ 27.002–89 [1], отсутствуют зависимости между полным, расчетным и остаточным ресурсами, проектными, фактическими и нормативными запасами прочности.

С целью определения полного, расчетного и остаточного ресурсов предлагается метод прогнозирования ресурса, основанный на использовании фактических (прямых) параметров технического состояния, который включает:

- фактически действующие нагрузки;
- прочностные характеристики материалов конструкций, определенные механическими испытаниями;
- нормативные запасы прочности, принятые при проектировании;
- фактические запасы прочности, определенные при оценке технического состояния;
- степень износа узлов, деталей и элементов;
- объемы технического диагностирования.

Полный ресурс $T_п$ от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние представим в виде суммы расчетного (назначенного) ресурса безопасной эксплуатации до диагностирования и остаточного ресурса до перехода в предельное состояние

$$T_п = T_k + T_о, \quad (1)$$

где $T_k$ – расчетный или назначенный ресурс, отработанный техническим устройством за предшествующий период эксплуатации до текущего диагностирования;

$T_о$ – остаточный ресурс технического устройства от момента текущего диагностирования до перехода в предельное состояние.

Расчетный ресурс безопасной эксплуатации до диагностирования машины зададим функцией

$$T_k = f(n_н;\ n_p;\ n_k;\ V_п;\ K_э;\ W_{эфф};\ \xi;\ \beta). \quad (2)$$

Рассмотрим каждую из составляющих, входящих в функцию (2).

Нормативный запас прочности $n_н$ определяется известным отношением предела текучести материала к допускаемым напряжениям

$$n_н = \frac{\sigma_т}{[\sigma]}.$$

Полный запас прочности $n_p$ [8] может быть представлен в виде нормативного $n_н$ и дополнительного $n_k$ коэффициентов запаса прочности (ползучести, устойчивости и т.п.) по формуле

$$n_p = n_н n_k. \quad (3)$$

При проектировании увеличение сечений деталей, округляемых до стандартных размеров проката, создает дополнительные запасы прочности $n_k$. В процессе эксплуатации запасы прочности $n_k$ снижаются от исходной величины до текущего значения, определяемого на момент времени диагностирования. Текущий запас прочности (ползучести, устойчивости и т.п.), изменяющийся от момента изготовления до момента окончания назначенного ресурса, определяется методом, изложенным в работе [3] для различных конструкций и условий нагружения. По рекомендациям, изложенным в работе [8], текущий запас прочности определяется условием:

$$n_k = \min\left\{\frac{[P]}{P};\ \frac{[\sigma]}{\sigma};\ \frac{[\sigma]_{экв}}{\sigma_{экв}};\ \frac{[K]_I}{K_I};\ \frac{[N]}{N};\ \frac{[B]}{B};\ \frac{[Y]}{Y}\right\}, \quad (4)$$

где $[P]$, $P$; $[N]$, $N$; $[B]$, $B$; $[Y]$, $Y$ – допускаемые и расчетные (фактические) величины соответственно постоянных, циклических нагрузок, ползучести и устойчивости;

$[\sigma]$, $\sigma$ – допускаемые и расчетные (фактические) напряжения;

$[\sigma]_{экв}$, $\sigma_{экв}$ – допускаемые и расчетные (фактические) эквивалентные напряжения (или амплитуды напряжений при циклических нагрузках);

$[K]_I$, $K_I$ – допускаемые и расчетные (фактические) коэффициенты интенсивности напряжений.

По мере износа элементов и снижения полного запаса прочности $n_p$ до нормативного $n_н$ ресурс безопасной эксплуатации, заданный при проектировании, снижается до предельно допустимого, когда дальнейшая эксплуатация становится небезопасной. Нормативный запас прочности при этом может являться ориентиром, показывающим насколько фактический запас прочности элемента близок к нему. Поэтому нормативный запас, по мнению авторов, может быть принят в качестве предельно допустимого запаса прочности, обеспечивающего безопасную эксплуатацию машины, а отношение текущего запаса прочности к нормативному является ориентиром, показывающим, насколько остаточный ресурс близок к нулю. Допускаемые значения величин, находящиеся в числителе формулы (4), могут быть определены при проектных или фактических параметрах эксплуатации по допускаемым прочностным характеристикам материалов, в знаменателе даются расчетные значения, определяемые по фактическим толщинам стенок или сечениям узлов, деталей и элементов. Исходный запас прочности детали на момент проектирования $n_k = n_{k_0}$ определяется по формуле

$$n_{k_0} = q\frac{S - C}{S_р},$$

где $q$ – показатель коррозии и коррозионной стойкости материала, определяемый согласно ГОСТ 9.908–85 [2];

$S$ – проектное сечение детали;

$C$ – допуск на размер;

$S_р$ – расчетное сечение, обеспечивающее прочность детали.

На момент текущего диагностирования после некоторого периода времени эксплуатации $k$ текущий запас прочности $n_k = n_{k_t}$ определяется по формуле

$$n_{k_t} = q\frac{S_k - \Delta S_k}{S_р}, \quad (5)$$

где $S_k$ – минимальное фактическое сечение детали на момент текущего диагностирования;

$\Delta S_k$ – износ детали за период времени $k$.

Износ за период эксплуатации

$$\Delta S_k = S_k - S_р. \quad (6)$$

При износе сечения до расчетной величины $S_р$ согласно формуле (5), запас прочности достигнет величины $n_k = 1$. При большем износе стенки фактическое сечение будет меньше расчетного, когда $S_k \le S_р$, $n_k$ будет стремиться к нулю, что не обеспечивает безопасности при дальнейшей эксплуатации технического устройства.

Скорость снижения запаса прочности по окончании назначенного ресурса по проектным и фактическим запасам прочности авторы предлагают определять формулой

$$v_п = \frac{n_{k_0} - n_{k_t}}{T_k}, \quad (7)$$

тогда значение назначенного ресурса безопасной эксплуатации до последующего диагностирования можно определить по формуле

$$T_k = \frac{n_{k_0} - n_{k_t}}{v_п}. \quad (8)$$

При $n_{k_t} > 1$ ресурс $T_k$, определенный формулой (8), гарантирует безопасную эксплуатацию технического устройства.

Для определения остаточного ресурса до перехода в предельное состояние используется формула

$$T_о = \frac{n_{k_t} - n_н}{v_п}, \quad (9)$$

где $n_н$ – предельно допустимый запас прочности, обеспечивающий безопасную эксплуатацию ТУ, $n_н \ge 1$.

Если $n_{k_t} < n_н$, то полный запас прочности согласно (3) будет ниже нормативного запаса прочности $n_p < n_н$, что приближает остаточный ресурс, определяемый формулой (9), к нулю, соответственно, эксплуатация технического устройства должна быть прекращена. Формулы, приведенные ранее, показывают общую закономерность прогнозирования ресурса при условии проведения полного технического диагностирования, которое не всегда осуществимо не только в производственных условиях, но и на заводе-изготовителе по ряду известных причин: высокой трудоемкости, ограничения доступа, погрешностей и несовершенства методов и приборов контроля, опыта и квалификации операторов, проводящих контроль и др.

В работе [9] показано влияние на ресурс количественных показателей эффективности, полноты и объемов технического диагностирования, степени ответственности (группы или класса опасности машин), характеризующей вероятную степень риска в случае отказа или разрушения. Сочетание названных показателей создает новый подход к прогнозированию ресурса, поясняемый блок-схемой оценки полного, расчетного и остаточного ресурсов машин, показанной на рис. 1.

Снижение запаса прочности определяется с учетом достоверности за период времени эксплуатации, а также в зависимости от проектных и фактических параметров эксплуатации. Степень риска при разрушении выражена группой или классом опасности машины. Коэффициент дефектности учитывает количество и опасность имеющихся дефектов, количественный показатель полноты и объемов технического диагностирования учитывает степень ответственности (группы или класса опасности), характеризующей вероятную степень риска в случае отказа или разрушения. На запасы прочности влияют показатели коррозии и коррозионной стойкости материалов [2], предельные нагрузки и деформации, количество циклов нагружения и механических напряжений, отнесенных к эксплуатационным нагрузкам, деформациям. Таким образом, зная время эксплуатации до текущего диагностирования и запасы прочности по исполнительным и фактическим сечениям, показана возможность определения полного, остаточного и расчетного ресурсов.

Показатель эффективности диагностирования зависит от выбора методов, физических объемов, за-

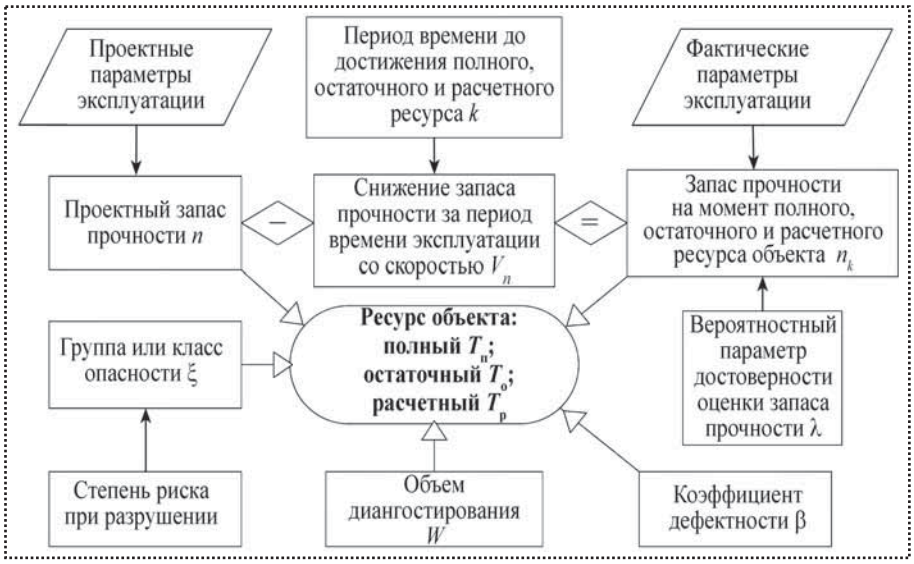



**Рис. 1. Блок-схема оценки полного, остаточного и расчетного ресурсов машин**

данной достоверности его проведения и вычисляется зависимостью [9]:

$$K_э = W_{эфф}^{(1+in\xi)}.$$

Здесь $W_{эфф}$ – эффективный объем диагностирования:

$$W_{эфф} = \frac{V_э}{s}, \quad (10)$$

где $V_э$ – физический объем диагностирования;

$s$ – нормировочный параметр применяемых методов диагностирования.

Коэффициент ответственности $\xi$, выраженный через параметры $\gamma$ и $\delta$, характеризующие степень опасности в случае разрушения, определяется по формуле

$$\xi = \gamma^{\ln \delta}. \quad (11)$$

Коэффициент ответственности $\xi$, определяемый формулой (11), является непрерывной величиной, и может служить абсолютным показателем степени опасности. Коэффициент дефектности $\beta$ принимается на основании [8] и учитывает наличие допустимых или недопустимых обнаруженных дефектов.

С учетом запаса прочности, заданной скорости износа, класса опасности и эффективного объема диагностирования ресурс узла, детали или элемента на момент изготовления предлагается определять зависимостью [10]:

$$T_п = f(n;\ v_п;\ W;\ \xi;\ \beta), \quad (12)$$

тогда ресурс элемента с учетом тех же величин на период времени $k$ может определяться зависимостью

$$T_k = f(n_k;\ v_k;\ W_k;\ \xi_k;\ \beta_k), \quad (13)$$

прогнозируемый ресурс элемента на период времени $(k + 1)$ после диагностирования – зависимостью

$$T_{(k+1)} = f(n_{(k+1)};\ v_{(k+1)};\ W_{(k+1)};\ \xi_{(k+1)};\ \beta_{(k+1)}). \quad (14)$$

Зависимости (12)–(14) дают возможность определить ресурс изношенных элементов, а также ресурс заменяемых или усиливаемых элементов.

Приведенные показатели, входящие в функцию (2), позволили получить аналитическую зависимость прогнозирования ресурса машин

$$T_k = T_э \sqrt{1 + W_{эфф}\beta\left(\frac{n - n_н}{n_k}\right)^{\xi}}, \quad (15)$$

где $T_э$ – время эксплуатации машины до технического диагностирования.

Приведенная аналитическая зависимость дает возможность прогнозирования ресурса на любом отрезке времени от изготовления до полного исчерпания ресурса машины. Ресурс в целом определяется по наиболее слабым узлам, деталям и элементам. Однако используемые методы прогнозирования ресурса, в том числе приведенные в работе [5], не предусматривают четкого разграничения, к чему отнесен определенный ресурс; к отдельному элементу, или к машине в целом. Методы проектирования также не предусматривают анализ равнопрочности конструкций, деталей и узлов, что в одних случаях вызывает избыточность запасов прочности, а в других – их недостаток для обеспечения заданного ресурса.

Ресурс машины, состоящей из деталей (элементов), в работе [10] предложено определять ресурсом наиболее слабой детали (элемента) следующими зависимостями:

- проектный (полный) ресурс от начала эксплуатации до перехода в предельное состояние

$$T_п = \min(T_{п_1};\ T_{п_2};\ \ldots\ T_{п_m});$$

- остаточный ресурс от момента диагностирования до перехода в предельное состояние

$$T_о = \min(T_{о_1};\ T_{о_2};\ \ldots\ T_{о_m});$$

- расчетный (допускаемый) ресурс, в течение которого изготовитель или экспертная организация гарантирует надежность и безопасную эксплуатацию

$$T_k = \min(T_{k_1};\ T_{k_2};\ \ldots\ T_{k_m});$$

- прогнозируемый ресурс на последующий период эксплуатации после технического диагностирования

$$T_{(k+1)} = \min(T_{(k+1)_1};\ T_{(k+1)_2};\ \ldots\ T_{(k+1)_m}).$$

При общем количестве рассчитываемых деталей (элементов) от 1 до $m$ минимальный запас прочности машины в целом определяется величиной запаса наиболее слабого элемента

$$N = \min(n_{1\ldots m}) \geq 1{,}0.$$

Количественная оценка запасов прочности наглядно показывает, какие параметры прочности являются определяющими для обеспечения равнопрочности узлов, деталей и элементов машины.

Запас прочности, снижающийся по мере износа узлов, деталей и элементов, нарастания в них напряжений, появления дефектов и деградации материала является величиной переменной, зависящей от полного, расчетного и остаточного ресурса и определяется функцией [10]:

$$n = f(T_п,\ T_k,\ T_о).$$

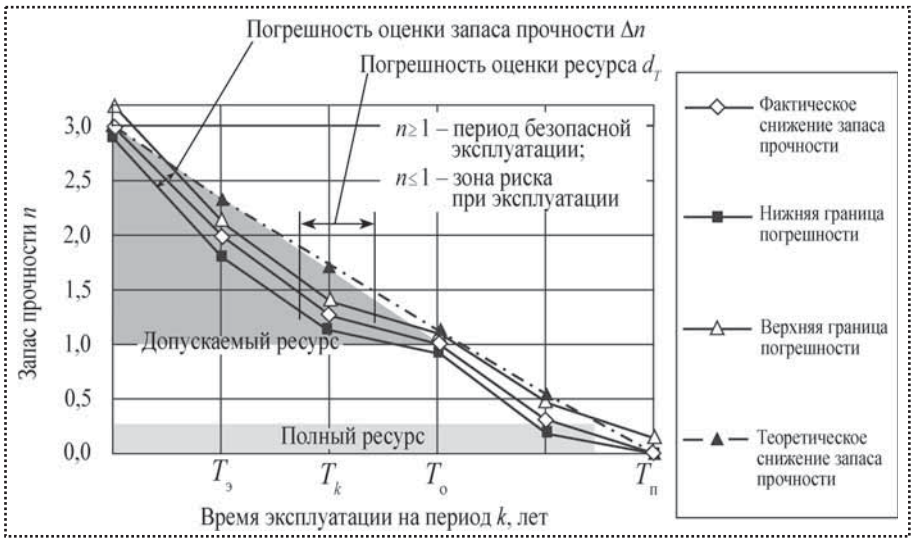



**Рис. 2. Зависимость ресурса от запаса прочности машины**

На рис. 2 приведена зависимость ресурса от запаса прочности машины. Теоретически снижение запаса прочности при эксплуатации имеет вид прямой линии. Фактическое снижение запаса прочности с учетом верхней и нижней границ погрешностей, которые названы погрешностями измерения приборами, измерительными датчиками, человеческим и другими факторами определяется по формуле (15). Так при снижении проектного запаса прочности от $n_p = 3{,}0$ за период от начала эксплуатации до $T_п$ наступает предельное состояние ($n_{k_t} \leq 1$) и полное исчерпание ресурса.

Для наглядности полный ресурс машины разделим на отдельные периоды по времени эксплуатации:

- до первого технического освидетельствования $T_э$, назначаемого по нормативам в зависимости от класса опасности машины;
- до окончания ресурса $T_k$, назначенного проектировщиком или изготовителем;
- до окончания ресурса $T_о$, назначенного при экспертизе промышленной безопасности;
- до наступления предельного состояния на период окончания ресурса $T_п$.

Предположим, что исходный запас прочности узла, детали или элемента при проектировании составляет $n_p = 3{,}0$, который по мере износа при эксплуатации снижается с некоторой скоростью, определяемой зависимостью (6). По окончании назначенного ресурса $T_k$, результатами диагностирования определены фактические сечения деталей, по которым рассчитаны фактические запасы прочности. Если на момент $T_k$ запас прочности составил $n_k = 1{,}5$, то дальнейшая эксплуатация может быть назначена до $T_о$.

Как видно из рис. 2, при наступлении времени $T_о$ будет достигнута величина запаса прочности $n_{(k+1)} = 1$, что соответствует остаточному ресурсу машины от момента текущего диагностирования до перехода в предельное состояние. При дальнейшем снижении запаса прочности экспертная организация может принять решение о продолжении эксплуатации, замене или усилении ослабленных элементов. Если износ, определяемый формулой (5), превысит допустимый, то текущий запас прочности будет находиться в пределах $n_{(k+1)} \leq 1$, а полный запас прочности будет ниже нормативного, т.е. $n_p < n_н$, при котором наступает предел прочности материала.

Снижение запаса прочности ниже единицы показывает, когда появляется зона риска при эксплуатации машины. В этом случае решение о замене или усилении ослабленных элементов должно быть однозначным. По мере износа элементов и снижения полного запаса прочности до нормативного ресурс безопасной эксплуатации, заданный при проектировании, будет исчерпан и дальнейшая эксплуатация становится небезопасной. При достижении запасов, равных $n_k$, может быть рекомендовано техническое диагностирование для оценки технического состояния и прогнозирование дальнейшего срока эксплуатации, поскольку при значениях $n_k \geq 1$ запасы прочности элементов достаточны для продолжения эксплуатации. При значениях $n_k \leq n_н$ запасы прочности становятся ниже нормативного, наступает предельное состояние, при котором невозможно гарантировать безопасную эксплуатацию машины.

Допускаемый (назначенный) ресурс может определяться разностью между расчетным ресурсом и величиной снижения ресурса согласно уравнению [10]:

$$[T] = \min(T_k - T_{сн}),$$

где $T_{сн}$ – снижение расчетного ресурса, определяемое проектировщиком или экспертной организацией по результатам дополнительных исследований, не имеющих расчетных параметров или по экспертной оценке [8], если не представляется возможным расчет ресурса заменяемых или усиливаемых элементов.

Коэффициенты запасов прочности используются в качестве показателя для оценки технического состояния сосудов давления (емкостей, теплообменников, колонн скрубберов, реакторов, резервуаров и трубопроводов) при ресурсно-прочностных исследо-

ваниях, проводимых в ОАО "Ангарская нефтехимическая компания" на протяжении ряда лет. Опыт работы показал, что по запасам прочности возможна оценка полного, остаточного и расчетного ресурсов узлов, деталей и элементов широкого класса машин, приборов, строительных конструкций, аппаратов, резервуаров и трубопроводов обрабатывающей, пищевой и химической промышленности. Показатели эффективности диагностирования, коррозионной стойкости материалов повышает точность прогнозирования ресурса машин.

## Выводы

*С использованием полученных зависимостей при проектировании машин возможно определение номинальных сечений деталей на заданный ресурс, а по заданному ресурсу возможно определение номинальных сечений деталей.*

*Предложенный метод прогнозирования полного, расчетного и остаточного ресурсов создает своего рода информационную среду для принятия мер по обеспечению надежности и безопасности машин, которые не имеют элементов резервирования.*

*Возможно использование нормативных запасов прочности в качестве предельно допустимых, обеспечивающих равнопрочность элементов машин.*

*Оценка полного, расчетного (допускаемого) и остаточного ресурсов при проектировании, изготовлении и экспертизе промышленной безопасности может использоваться в качестве технико-экономического показателя равнопрочности элементов, деталей и узлов при определении заданных сроков безопасной эксплуатации машин.*

## Библиографический список

1. **ГОСТ 27.002–2009.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения М.: Стандартинформ, 2011.

2. **ГОСТ 9.908–85.** Единая система зашиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1986.

3. **Махутов Н.А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Новосибирск: Наука, 2005. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. 494 с. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. 610 с.

4. **Махутов Н.А., Пимштейн П.Г.** Определение срока службы и остаточного ресурса оборудования // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1995. Вып. 5. С. 3–16.

5. **ПБ 03-246-98.** Правила проведения экспертизы промышленной безопасности. Утв. постановлением Госгортехнадзора России. № 64 от 06.11.1998.

6. **РД 03-421-01.** Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. Серия 03. Вып. 17. М.: Государственное унитарное предприятие "Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России", 2002. 136 с.

7. **РД 26.260.004-91.** Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. Химнефтемаш, 1991. 96 с.

8. **Сосуды** и трубопроводы высокого давления: справочник / А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. Изд. 2-е, доп. Иркутск: ГП "Иркутская областная типография № 1", 1999. 600 с.

9. **Черепанов А.П., Порошин Ю.В.** Оценка эффективности диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 10. С. 43–46.

10. **Черепанов А.П.** Выбор показателей для оценки полного расчетного и остаточного ресурса технических устройств // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 10. С. 43.

УДК 658.514:005.5+004.5

**Е.А. Данилов,** *инженер (ЗАО "Группа Энергетические Технологии и Решения")*
*E-mail: flash_man@bk.ru*

# Системы поддержки принятия решения в промышленных системах мониторинга

*Представлены основные причины внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решения (СППР) в современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП). Описаны типы производственных задач, для решения которых СППР будут наиболее эффективны.*

*The basic reasons for the introduction of intelligent decision support systems (DSS) in modern process control systems. Describes the types of production problems, for which the DSS will be most effective.*

**Ключевые слова:** СППР – Система поддержки принятия решений, система автоматизации, прогнозирование аварийных ситуаций, повышение эффективности решений.

**Keywords:** DSS – Decision Support System, automation systems, prediction of emergency situations, effectiveness of solutions.

Современный мир предъявляет все бóльшие требования к видам, разнообразию и качеству производимой продукции. Это приводит к тому, что автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), обеспечивающие производство, обрастают все большим количеством датчиков, контроллеров, увеличивается количество уровней иерархии системы и топология всей инфраструктуры в целом. Количество информации, поступающей в системы мониторинга и диспетчеризации, многократно приумножается. Бóльшая часть этой информации анализируется диспетчером или оператором. В ряде случаев, например, при аварийных и нештатных ситуациях – решение должно приниматься как можно оперативнее. В таких условиях нагрузка на диспетчера возрастает как в физическом плане – проанализировать большое количество параметров системы и принять во внимание все необходимые факторы, так и в психологическом плане – в сжатые сроки принять верное решение, чтобы предотвратить аварию. Однако человеку-оператору трудно отследить все возможные варианты развития событий и просчитать все взаимосвязи в системах мониторинга с большим количеством контролируемых параметров.

Исследования последних лет показывают, что эффективность оперативных решений может быть существенно повышена путем применения автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР), основанных на аналитических информационных технологиях. В основе указанных технологий лежит прогностический анализ производственных ситуаций, базирующийся на компьютерном анализе сверхбольших массивов ретроспективной информации. Указанный массив организован в виде хранилища данных (Data Warehouse, DW), накапливающего и сохраняющего весь производственный опыт по управлению производственными процессами. Специализированные программные средства OLAP (on-line analytical processing) позволяют агрегировать и визуализировать накопленные данные [1].

Сопоставление текущей ситуации с материалами предыстории управления позволяет сформировать виртуальные прогностические сценарии развития производственной ситуации, различающиеся между собой в зависимости от варианта принимаемого управляющего решения. Сравнение результатов прогностического анализа позволяет выбрать наилучшее решение и отвечающее ему оптимальное управление.

Возможный вариант построения аналитического управления производственными процессами (в том числе диспетчеризацией) связан с концентрацией хранилища данных и средств аналитической обработки в рамках единой аналитической службы предприятия, создаваемой на основе многофункциональной аналитической информационной системы (АИС). Техническая реализация АИС может сочетать использование типовых решений (например, от MicroSoft или Oracle), адаптированных под нужды конкретного предприятия, и уникальных алгоритмов, отдельно разрабатываемых по заказам предприятия сторонними организациями с целью эффективного решения специфических задач и составляющих главный элемент "know how" эксплуатируемой АИС [2].

Чтобы снизить нагрузку на диспетчера и влияние человеческого фактора при принятии решения в АСУТП, можно и нужно внедрять СППР. Существует множество определений СППР, отражающих точки зрения представителей различных дисциплин и научных школ. Так, СППР может определяться как "основанная на использовании моделей совокупность процедур по обработке данных и суждений, помогающих руководителю в принятии решений".

Как видно из рисунка, СППР может интегрироваться в АСУТП и рассматриваться как ее неотъемлемая часть. Наряду с такими системами, как SCADA или MES-системами, СППР может выполнять свою узкоспециализированную функциональную задачу и быть связующим звеном между мониторингом и принятием управленческих решений по управлению технологическим процессом.

В некоторых случаях предлагается рассматривать СППР в качестве "интерактивных автоматизированных систем, которые помогают лицам, принимающим решения (ЛПР), использовать данные и модели, чтобы решать неструктуризованные проблемы". СППР может выглядеть как "компьютерная информационная система, используемая для поддержки различных видов деятельности при принятии решений в ситуациях, где невозможно или нежелательно иметь автоматическую систему, которая полностью выполняет весь процесс решения". Большинство исследователей согласны, что СППР предназначены для решения слабоструктуризованных проблем [3].

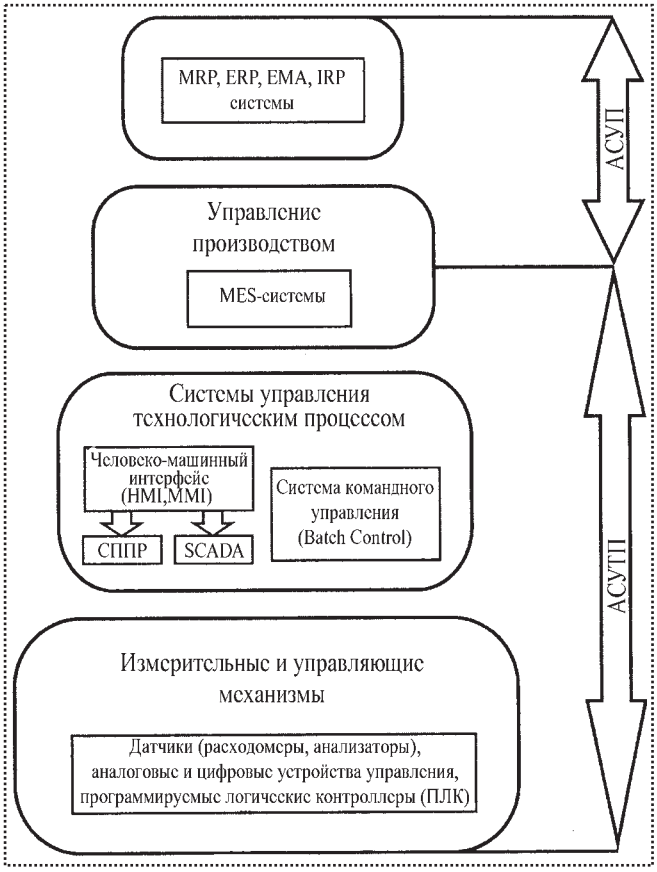
Большое количество задач являются многокритериальными, т.е. приходится оценивать множество сил, влияний, интересов и последствий, характеризующих варианты решений [2].

Слабоструктурированными и трудноформализуемыми задачами в системах АСУТП можно считать, например, поиск и диагностику аварийных и нештатных ситуаций.

В условиях единой аналитической службы ее персонал (предметные эксперты, эксперты-аналитики и др.) получает возможность реализации подхода к решению нетривиальных задач путем последовательных приближений описания формальной постановки задачи, мозгового штурма в определении гипотез, эвристического выбора математического аппарата и эмпирической оценки получаемых моделей и решений.

В общем случае аналитическая служба может решать задачи двух типов:

• разовые задачи по однократным заявкам должностных лиц подразделений предприятия;




**Интеграция СППР в АСУТП**

• анализ нетиповых ситуаций, разработка моделей управляемых процессов, прогноз развития ситуаций при определенных условиях и т.д.

Однако при принятии решений по многим критериям существует и объективная составляющая. Обычно эта составляющая включает в себя ограничения, накладываемые внешней средой на возможные решения (наличие ресурсов, временные ограничения, экологические требования, социальная обстановка и т.п.).

Многочисленные психологические исследования показывают, что сами ЛПР без дополнительной аналитической поддержки используют упрощенные, а иногда и противоречивые решающие правила [2].

Поддержка принятия решений и заключается в помощи ЛПР в процессе принятия решения. Она включает [2]:

• помощь ЛПР при анализе объективной составляющей, т.е. в понимании и оценке сложившейся ситуации и ограничений, накладываемой внешней средой;

• выявление предпочтений ЛПР, т.е. выявление и ранжирование приоритетов, учет неопределенности в оценках ЛПР и формирование его предпочтений;

• генерацию возможных решений, т.е. формирование списка альтернатив;

• оценку возможных альтернатив, исходя из предпочтений ЛПР и ограничений, накладываемых внешней средой;

• анализ последствий принимаемых решений;

• выбор лучшего, с точки зрения ЛПР, варианта.

Компьютерная поддержка процесса принятия решений так или иначе основана на формализации методов получения исходных и промежуточных оценок, даваемых ЛПР, и алгоритмизации самого процесса выработки решения.

### Заключение

*Увеличение объема информации, поступающей в органы управления и непосредственно к руководителям или диспетчерам промышленных систем мониторинга и оперативного управления, усложнение решаемых задач, необходимость учета большого числа взаимосвязанных факторов и быстро меняющейся обстановки настоятельно требуют широко использовать вычислительную технику в процессе принятия решений. В связи с этим в системах управления все шире используется новый класс вычислительных систем – системы компьютерной поддержки принятия решений.*

*Компьютерная поддержка принятия решений позволяет руководителю наряду с объективными оценками использовать свои субъективные, присущие только ему методы генерации и оценки возможных вариантов принимаемых решений, используя всю мощь программного обеспечения для реализации своего стиля выработки и принятия решений.*

### Библиографический список

1. **Мусаев А.А., Шерстюк Ю.М.** Автоматизация диспетчеризации производственных процессов промышленных предприятий // Автоматизация в промышленности. 2003. № 9. С. 36–43.

2. **Трахтенгерц Э.А.** Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений // Проблемы управления. 2003. № 1. С. 13–28.

3. **Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P., Uthurusamy R.** Advances in knowledge discovery and data mining. AAAI/MIT Press, 1996.

## Читайте в следующем номере в рубрике "Современные технологии сборки"

- **Широкий А.В., Кристаль М.Г.** Моделирование процесса пассивного ориентирования деталей в вибрационных бункерных загрузочных устройствах
- **Кузнецова С.В., Симаков А.Л.** Математическая модель процесса адаптации положения детали при автоматизированной сборке
- **Редин В.Н., Аббясов В.М.** Разработка метода оценки нагруженности элементов технологических роботизированных комплексов

УДК 514.851

**Л.А. Кашуба,** *канд. техн. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
*E-mail: leonid-ak@mail.ru*

# Алгоритмы моделирования геометрии реальной детали

*Показано, что основой детерминированного представления реальной геометрии детали является номинальная геометрия поверхности. Рассмотрены две компоненты отклонения формы реальной поверхности от номинальной: эквидистантное смещение и искривление, обусловленное технологией формирования. Расположение реальной поверхности в системе координат базы имеет также две компоненты: смещение и поворот системы координат реального элемента относительно базы. В результате детерминированного представления каждой реальной поверхности в системе координат базы пересечение реальных поверхностей деталей ограничивает ее объем и в современных CAD системах производится расчет всех геометрических параметров: объема, площади поверхности и параметров геометрии масс объема детали. На основании стохастического моделирования методом Монте-Карло разработана вероятностная модель параметров детали.*

*It is shown that the basis of a deterministic representation of the actual part geometryis nominal geometry of surfaces. Considered two components of the deviation of the actual surface shape of the face: equidistant offset and distortion due to the forming technology. The location of the actual surface of the base coordinate system also has two components: the displacement and rotation of the coordinate system of the realelement relative to the base. As a result of a deterministic representation of each of the real surface of the base coordinate system, the intersection of the real surfacedetail limits its scope in modern CAD systems is the calculation of all the geometric parameters: volume, surface area and geometry parameters of mass volume parts. Based on stochastic simulation Monte Carlo method developed bot probability modelparameter details.*

**Ключевые слова:** номинальная поверхность, реальная поверхность, система координат базы, эквидистантное смещение и искривление номинальной поверхности, детерминированная модель реальной поверхности, смещение и поворот реальной поверхности, детерминированная модель детали, вероятностная модель детали, метод Монте-Карло, закон распределения, доверительная вероятность, число реализация.

**Keywords:** nominal surface, the real surface, the system of coordinates of the base, eguidistant offset and curvature of the face surface, deterministic model of the real surface, the displacement and rotation of the real surface, deterministic model the details, the probability model the details, Monte Carlo method, distribution law, condidential probability, the number of implementations.

## 1. Моделирование реальных поверхностей и деталей с реальными поверхностями

Основой моделирования реальной геометрии деталей машин является номинальная геометрия всех их поверхностей с привязкой их номинальных систем координат к системе координат базы.

**1.1. Модель номинальной поверхности в номинальной системе координат.** Все номинальные поверхности, имеющие кривизну, могут быть представлены *параметрическими кривыми u* и v на поверхности. Радиус-вектор *r*, определяющий положение каждой точки и координаты точки поверхности в некоторой системе координат *OXYZ* определяются уравнениями:

$$r = r(u,\ \mathrm{v});$$

$$x = x(u,\ \mathrm{v});$$

$$y = y(u,\ \mathrm{v});$$

$$z = z(u,\ \mathrm{v}).$$

В компьютерной графике номинальная поверхность с кривизной задается сеткой узлов номинальной поверхности.

**1.2. Модель формы реальной поверхности в номинальной системе координат базы.** Ранее было показано, что отклонение формы реального элемента от номинальной имеет две компоненты [1]:

- эквидистантное смещение относительно номинальной поверхности;
- искривление номинальной поверхности, аналогичное по смыслу шероховатости и волнистости.

На отклонение формы поверхности от номинальной желательно задать поле допуска, расположенное определенным образом относительно номинальной поверхности.

Первой задачей является формирование детерминированной[1] модели отклонения формы поверхностей, выполненных одним технологическим методом.

Начнем с номинальной поверхности, имеющей кривизну в системе координат номинальной поверхности (элемента) – рис. 1, *а*.

[1] Детерминированный (**от лат.** determine – определяю) – обусловленный необходимой причинной связью.

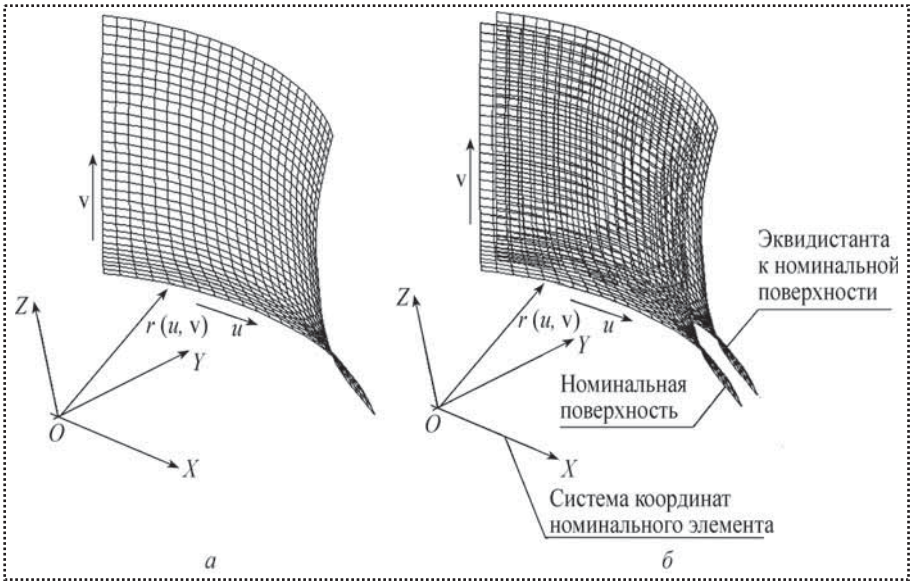



**Рис. 1. Представление номинальной поверхности в параметрической форме:**
*а* – номинальная геометрия поверхности в номинальной системе координат; *б* – эквидистантная поверхность со случайным смещением узлов сетки по нормали к поверхности в системе координат нормального элемента

Сформируем детерминированную модель случайной по направлению и величине смещения ε к исходной номинальной поверхности (рис. 1, *б*). Форму номинальной и эквидистантной поверхностей в номинальной системе координат элемента можно представить сеткой *u*v линий и узлов поверхности, смещенной по отношению к номинальной поверхности.

"Искривим" полученную модель эквидистантной поверхности случайным смещением ее узлов по нормали к эквидистантной поверхности, в соответствии с особенностями технологии формирования. Смещения узлов отражают, прежде всего, искривление номинальной поверхности, аналогичное по смыслу шероховатости и волнистости. Суммарное смещение вызвано эквидистантным отклонением формы и отклонением, обусловленным технологией формирования поверхности. Оно не должно превосходить по величине допустимое отклонение формы.

Здесь возникают две проблемы:

• первая – проблема формирования исходных данных для моделирования случайных смещений узлов номинальной поверхности и алгоритма самого моделирования искривления реальной поверхности при формировании реальной поверхности известным технологическим методом;

• вторая – проблема разработки алгоритма формирования искривленной поверхности со смещенными узлами в номинальной системе координат элемента с учетом величины поля допуска реальной поверхности по отношению к номинальной.

Для номинальной плоскости, не имеющей кривизны, задача моделирования искажения формы поверхности начинается так же как и в случае с поверхностью, кривизна которой не равна нулю. В отличие от поверхности, имеющей кривизну, для точек реальной поверхности не производят случайной по направлению и величине смещения ε эквидистанты к исходной искривленной поверхности. Форму реальной поверхности в номинальной системе координат такого элемента можно представить поверхностью (плоскостью) в номинальной системе координат, дополнив его случайным набором смещений узлов номинальной поверхности по нормали к поверхности, в соответствии с особенностями технологии ее формирования.

В соответствии с правилами привязки номинальной системы координат номинальных поверхностей [4] система координат реального элемента может быть отождествлена с системой координат эквидистантного элемента, прилегающего к реальному элементу.

Этим заканчивается формирование случайной реализации формы реальной поверхности в номинальной системе координат базы для номинальной поверхности.

**1.3. Модель отклонения расположения реальной поверхности в номинальной системе координат базы.** Займемся моделированием расположения реальной поверхности, имеющей только отклонения формы, в системе координат базы. Поместим в выбранную систему координат базы систему координат реальной поверхности, эквидистантно смещенную и искривленную без смещения и поворота. Положение системы координат такой поверхности определяют радиус-вектор $R_{нi}$ и матрица $A_{нi}$.

Отклонение расположения системы координат реального элемента от его номинального расположения в системе координат элемента, принятого за базу (системе координат базы), также имеет две компоненты:

• смещение системы координат реального элемента $X_р Y_р Z_р$ относительно системы координат номинального элемента $X_н Y_н Z_н$ в системе координат элемента $X_б Y_б Z_б$, принятого за базу, на расстояние $r_0$ от номинального положения;

• поворот системы координат реального элемента (матрица поворота $A_р$) относительно системы коор-

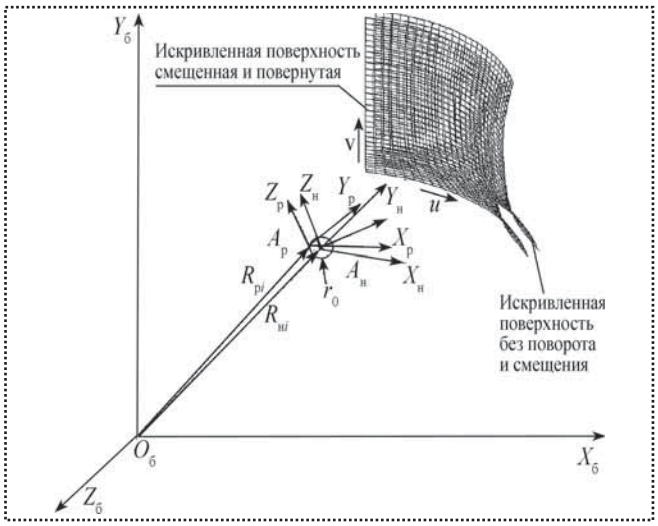



**Рис. 2. Искривленная поверхность со смещением и поворотом системы координат реальной поверхности относительно базы**

динат номинального элемента в системе координат элемента ($A_н$), принятого за базу.

На отклонение расположения системы координат реального элемента от его номинального расположения в системе координат элемента, принятого за базу, также желательно задать поля допусков как на величину смещения, так и на величину поворота системы координат реального элемента относительно их номинальных значений в системе координат проекта.

Начало системы координат эквидистантно смещенной и искривленной реальной поверхности в системе координат базы сместим от номинального положения на величину погрешности расположения [4], находящуюся в пределах поля допуска, определенного сферой радиуса $r_0$. Слегка повернем оси системы координат реальной поверхности на углы универсальных геометрических параметров α, β и γ, равные погрешностям поворота системы координат реальной поверхности относительно базы (рис. 2).

Полученные параметры формы номинальной поверхности с измененной случайной кривизной и эквидистантным положением поверхности, а также параметрами положения $R_{pi}$ и $A_{pi}$ дают нам случайную реализацию формы и расположения одной из поверхностей детали в системе координат базы.

Для детерминированного представления формы реальных поверхностей необходима разработка алгоритма отклонения формы реальной поверхности (эквидистантное отклонение и отклонение, обусловленное принятой технологией) и шести случайных координат положения системы координат реальной поверхности в системе координат базы (три координаты положения начала координат и три угла поворота системы координат реальной поверхности). Отклонения формы и расположения поверхностей связаны с аналогичными параметрами технологического процесса и учитываются на ранних этапах моделирования геометрии изделия.

Этим заканчивается формирование случайной реализации формы реальной поверхности в номинальной системе координат базы для номинальной поверхности.

**1.4. Модель детали с реальными поверхностями.** Теперь можно перейти к моделированию реальных деталей с реальными поверхностями детали.

В качестве примера рассмотрим моделирование реальной детали, ограниченной цилиндрической поверхностью диаметром $D$ и образующей $L$ с двумя плоскими (в номинальной форме) торцами, аналогичной использованной в работе [1] (рис. 3).

Модель детали с реальными поверхностями будем строить от известной формы и расположения поверхностей номинальной геометрии детали.

Задача формирования собственных систем координат номинальных поверхностей решается различно для поверхностей, имеющих кривизну, отличную от нуля (несимметричных и осесимметричных поверхностей) и для поверхностей, не имеющих кривизны (плоскостей).

Номинальные системы координат номинальных поверхностей могут быть сформированы двумя способами:

• на трех произвольных точках, не лежащих на одной прямой;

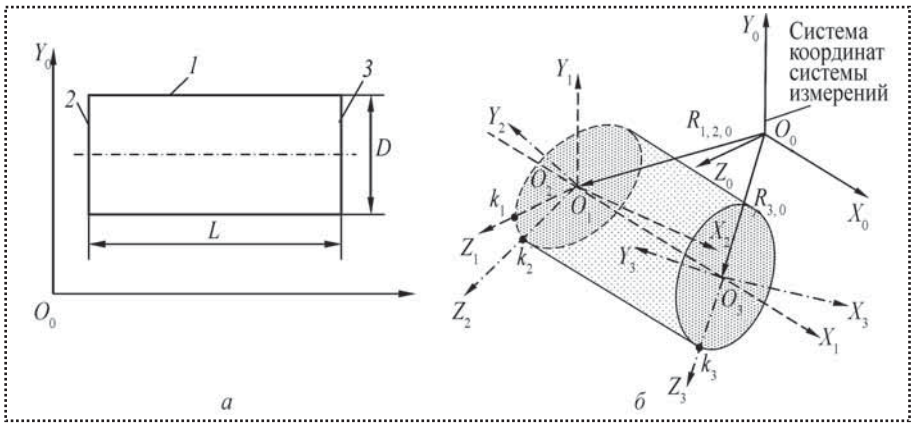



**Рис. 3. Номинальная геометрия детали в номинальной системе координат:**
*а* – проекция детали на плоскость; *б* – ее изображение в пространстве

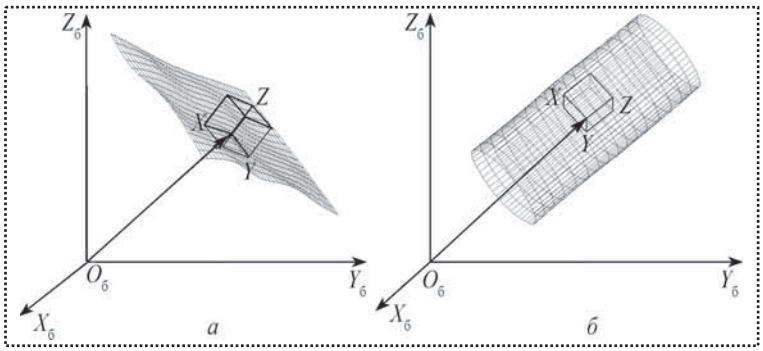



**Рис. 4. Моделирование реальных поверхностей:**
*а* – модель реальной плоскости; *б* – модель реального цилиндра

• на направлении и двух точках, одна из которых лежит на направлении.

Номинальная система координат номинальной несимметричной поверхности определена координатами ее точек (если заданы координаты точек номинальной поверхности в номинальной системе координат, то тем самым определено положение самой номинальной системы координат). Номинальная система координат номинальной осесимметричной поверхности (рис. 2, *б*) определена координатами точки $O_1$, через которую проходит ее ось, направлением оси осесимметричной поверхности, и координатами произвольной точкой $k_1$ на образующей осесимметричной поверхности.

Номинальная система координат номинальных плоскостей определена направлениями нормалей к номинальным плоскостям, центрами симметрии номинальных торцовых плоскостей $O_2$ и $O_3$ и реперными точками $k_2$ и $k_3$, принадлежащих этим плоскостям.

Произведем моделирование отклонения формы и расположения каждой поверхности в произвольно выбранной базе по описанному ранее алгоритму и определим положение систем координат реальных поверхностей в такой базе. Поверхностное (surfase) моделирование сеток *u*v линий представлено на рис. 4.

После моделирования каждой из поверхностей по предложенным алгоритмам к каждой смоделированной поверхности можно привязать систему координат реальной поверхности [1].

Процедуру моделирования всех поверхностей детали можно провести относительно номинальной геометрии детали в системе координат произвольно расположенной базы, привязав к реальным поверхностям системы координат реальных поверхностей (рис. 5, *а*).

Положение номинальной системы координат поверхности в системе координат базы определяется вектором $R_i$ положения начала номинальной системы координат поверхности и матрицей $A_i$ направляющих косинусов ее осей.

Для обеспечения пересечения поверхностей их величина должна быть несколько больше, чем у номинальной геометрии. После пересечения, "обрезки" лишнего материала и "окрашивания" поверхностей (рис. 5, *б*), что легко осуществляется в современных CAD системах, получим геометрию детерминированной реализации реальной детали с реальными поверхностями в системе координат базы. Способ формирования реальной геометрии деталей пересечением реальных поверхностей (surfase) отличается от традиционного твердотельного (solid), принятого в современных САПР.

Объем детали, заключенный внутри наружной поверхности, представляет собой систему материальных точек (частиц), в которой расстояния между двумя любыми точками остаются постоянными:

$$V = \int\int\int f(x,\ y,\ z)dxdydz,$$

где $f(x,\ y,\ z)$ – границы объема детали.

Такую систему называют *неизменяемой системой*. Если же, кроме того, точки системы расположены непрерывно, т.е. заполняют область пространства, занятую системой, сплошным образом, то такую неизменяемую систему называют *абсолютно твердым телом*. Абсолютно твердое тело, согласно определению, не может быть подвержено никаким деформациям и представляет собой идеальный образ, который тем ближе подходит к реальному твердому телу, чем меньше последнее способно деформироваться под действием сил.

Твердое тело позволяет с достаточной достоверностью сформировать представление модели детали с

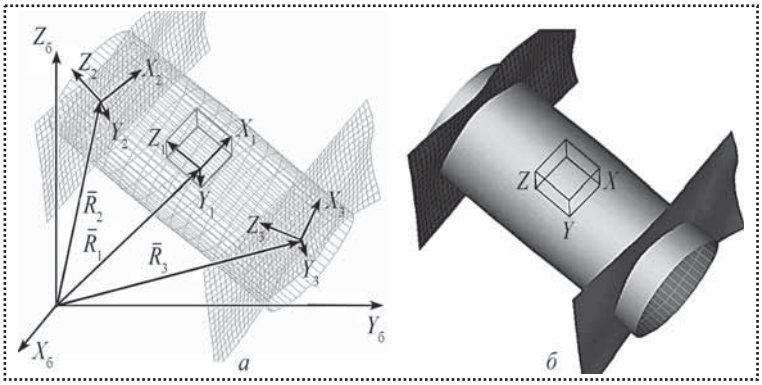



**Рис. 5. Моделирование реальной поверхности детали:**
*а* – сетками *u*v линий; *б* – после "окрашивания" наружной поверхности

учетом погрешностей формы и расположения всех ее поверхностей.

Если плотность ρ материала детали постоянна, то масса детали $M_{д\ ст} = \rho V$.

Для объема твердого тела справедливы положения геометрии масс:

• тензор инерции в точке $O$ твердого тела в связанной с телом системе координат $OXYZ$ задают матрицей осевых и центробежных моментов инерции вида

$$(J) = \begin{vmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & J_{zz} \end{vmatrix},$$

где $x$, $y$, $z$ – координаты малого элемента тела объемом $dV$, плотностью ρ и массой $dm$;

$$J_{xx} = \rho \int_{(V)} (y^2 + z^2) dV = \int_{(m)} (y^2 + z^2) dm,$$

$$J_{yy} = \rho \int_{(V)} (x^2 + z^2) dV = \int_{(m)} (x^2 + z^2) dm,$$

$$J_{zz} = \rho \int_{(V)} (y^2 + x^2) dV = \int_{(m)} (y^2 + x^2) dm,$$

$$J_{xy} = J_{yx} = \rho \int_{(V)} xy dV = \int_{(m)} xy dm,$$

$$J_{xz} = J_{zx} = \rho \int_{(V)} xz dV = \int_{(m)} xz dm,$$

$$J_{zy} = J_{yz} = \rho \int_{(V)} zy dV = \int_{(m)} zy dm.$$

Ось $OX$ называется *главной осью инерции тела,* если центробежные моменты инерции $J_{xy}$ и $J_{xz}$ одновременно равны нулю. Через каждую точку тела можно провести три главные оси инерции. Эти оси взаимно перпендикулярны друг другу. *Моменты инерции тела* относительно трех главных осей инерции, проведенных в произвольной точке $O$ тела, называются *главными моментами инерции тела.*

Главные оси инерции, проходящие через *центр масс* тела, называются *главными центральными осями инерции тела*, а моменты инерции относительно этих осей – его *главными центральными моментами инерции. Ось симметрии* однородного тела всегда является одной из его главных центральных осей инерции.

В современных CAD системах производится расчет всех геометрических параметров и геометрии масс детали (рис. 6).

**Рис. 6. Результат одной детерминированной точной модели сборки реальной детали из реальных поверхностей**

Линии пересечения поверхностей могут быть дополнены фасками и скруглениями, а параметры объема, площади поверхности и тензора инерции могут быть уточнены.

На этом завершается формирование детерминированной модели детали с реальными поверхностями.

## 2. Вероятностная модель детали

Процесс изготовления деталей со случайными поверхностями носит случайный (вероятностный) характер, обусловленный множеством случайных событий. Поэтому его можно рассматривать как случайное событие и моделирование реальных деталей с реальными поверхностями должно носить такой же характер.

Под ***случайным событием*** условимся понимать многомерную случайную величину, случайную функцию одной или нескольких переменных и вообще любые объекты, выбор которых определяется соответствующими вероятностными распределениями.

Под ***реализацией случайного события*** будем понимать сам акт выбора, т.е. статистическую выборку одного элемента из множества, наделенного вероятностной мерой.

Всю рассматриваемую совокупность деталей партии можно анализировать на основе обработки результатов моделирования их случайных реализаций по параметрам *детерминированной модели*. Каждую реализацию геометрии детали, в свою очередь, можно рассматривать как совокупность реализаций их реальных поверхностей. Поэтому начнем с формирования реальной поверхности.

Повторяя предложенную процедуру для всех поверхностей, продлевая и пересекая поверхности, получим случайную ***реализацию всех реальных поверхностей детали в системе координат базы.***

**2.1. Аппарат моделирования вероятностных оценок – метод Монте-Карло.** Метод Монте-Карло (ММК) – общее название группы численных методов, основанных на получении большого числа реализаций стохастического (случайного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи.

Проблемы метода Монте-Карло:

1) выбор законов распределения входных параметров, исходя из имеющейся исходной информации;

2) определение необходимого и достаточного числа реализаций, обеспечивающих требуемую доверительную вероятность интервала распределения выходных параметров с достаточной статистической надежностью.

**2.2. Выбор законов распределения для моделирования.** Все множество параметров и видов полей допусков на параметры деталей можно условно разделить на две группы:

• параметры, номинальное значение которых $x_{ном} \neq 0$ может находиться на неограниченном интервале $-\infty < x_{ном} < +\infty$, а действительное значение параметра $x$ – на интервале, ограниченном границами поля допуска $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ (таких большинство);

• параметры, номинальное значение которых $x_{ном} = 0$, а действительное значение параметра $x$ – на интервале, ограниченном полем допуска $0 \leq x \leq x_{max}$ (таких много меньше).

Суждение о действительном значении параметра объекта производства в технологическом процессе является результатом взаимодействия погрешности формирования параметра и погрешности измерения сформированного параметра.

Таким образом, при оценке действительного значения параметра и положения его значения относительно границ поля допуска имеется неопределенность, обусловленная случайным характером как погрешности формирования параметра, так и погрешности его измерения.

Согласно К. Шеннону мерой неопределенности ситуации, описываемой случайной величиной $x$, является энтропия

$$H = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx,$$

являющаяся функционалом дифференциальной функции распределения $p(x)$ случайной величины $x$. Количественной мерой энтропии является информационная неопределенность, характеризуемая величиной интервала, соответствующего заданной доверительной вероятности $P_д$.

В реальной жизни ни один из законов распределения погрешностей формирования параметров и измерения не выполняется. Однако некоторая часть из них имеет большой практический интерес.

Этот интерес сводится к следующему.

Допустим, что случайная величина изменяется на некотором ограниченном или неограниченном интервале по закону распределения, параметры которого неизвестны. Каким должен быть закон с известными статистическими параметрами[2], имеющий те же границы, математическое ожидание или дисперсию, чтобы интервал, соответствующий заданной вероятности $P$, был наибольшим из всех возможных?

Если такой закон использовать при оценках практических интервалов рассеяния реальных распределений, имеющих те же границы, математическое ожидание или дисперсию, что и у закона распределения, используемого вместо реального, то интервал рассеяния реального закона при тех же значениях вероятности $P$ меньше заданной величины и находится внутри практического интервала рассеяния модельного закона, используемого вместо реального.

Следовательно, при любых реальных законах распределений, имеющих те же границы изменения, математическое ожидание или дисперсию, оценка интервала, соответствующего доверительной вероятности $P_д$ модельного распределения, используемого вместо реального распределения, будет наибольшей (вероятностной "оценкой сверху"). При тех же значениях доверительной вероятности $P_д$ практический интервал рассеяния реального закона распределения не выйдет за пределы практического интервала рассеяния модельного закона, используемого вместо реального.

Можно предположить, что любой процесс формирования или измерения параметров складывается таким образом, что неопределенность результата того и другого оказывается наибольшей в некоторых пределах, определяемых допускаемыми значениями интервала погрешности, соответствующей доверительной вероятности $P_д$. Поэтому наиболее предпочтительными для оценок информационной неопределенности вне связи с действительным характером (законом) распределения погрешности формирования или измерения должны быть такие распределения $p(x)$, при которых энтропия обращается в максимум.

В ряде теорем теории информации [4] К. Шеннон доказал следующие фундаментальные утверждения:

---

[2] К статистическим параметрам относят: размах вариационного ряда; центр группирования вариационного ряда – математическое ожидание; центральный момент второго порядка – дисперсию.

• если имеется энтропия непрерывного процесса со случайной координатой, принимающей значения только на заданном отрезке $[a, b]$, то интервал, соответствующий заданной доверительной вероятности $P_д$, максимален при равномерной (равновероятной) плотности распределения;

• в случае, когда известна дисперсия $D_x$ случайной координаты непрерывного процесса, то интервал, соответствующий заданной доверительной вероятности $P_д$, максимален при нормальном законе распределения с той же дисперсией;

• для существенно положительных величин с заданным средним (математическим ожиданием $\mu_x$) интервал, соответствующий заданной доверительной вероятности $P_д$, максимален при экспоненциальном законе распределения.

Отсюда следуют важные для практических расчетов рекомендации.

Если известно, что рассеяние параметра не выходит за пределы отрезка $[a, b]$, то независимо от действительного характера его распределения на этом отрезке максимальная неопределенность и практический интервал рассеяния, соответствующий доверительной вероятности $P_д$, будут наибольшими при равновероятном законе. Иными словами, если на этом интервале параметр распределен по любому закону, отличному от равновероятного, доверительные интервалы рассеяния, соответствующие вероятности $P_д$, находятся внутри доверительного интервала равновероятного распределения.

Если известны дисперсия $D_x$ параметра, функция распределения вероятностей $p(x)$ изменяется на неограниченном интервале $(-\infty < x < +\infty)$, то доверительный интервал рассеяния параметра при той же доверительной вероятности $P_д$ будет наибольшим, если параметр распределен по нормальному закону с дисперсией $D_x$. Интервалы рассеяния других распределений, имеющих то же значение $D_x$, при той же вероятности $P_д$ находятся внутри доверительного интервала нормального распределения.

Наконец, если параметр существенно положителен, функция распределения вероятностей $p(x)$ изменяется на неограниченном интервале $(0 < x < +\infty)$, то при одном и том же математическом ожидании $M_x$ и доверительной вероятности $P_д$ доверительный интервал на экспоненциальном законе будет охватывать аналогичные интервалы любых других распределений на неограниченном интервале $(0 < x < +\infty)$.

Таким образом, параметры статистики размах $R$ дисперсия $D$ и математическое ожидание $M_x$ непосредственно связаны с законами распределения для оценок "сверху" интервалов рассеяния, соответствующих заданной доверительной вероятности.

В таблице 1 приведены формулы плотности распределения $p(x)$ и вероятности $P(x)$ для перечисленных законов, а также графическое отображение зависимостей $p(x)$ и $P(x)$.

**2.3. Определение количества реализаций.** Определение границ доверительного интервала рассеяния выходного параметра при статистическом моделировании наиболее эффективно определить с помощью ***непараметрических толерантных интервалов*** [2, 3].

Минимальные объемы выборок $N$ в зависимости от значений доверительного интервала $P_д$ при статистической надежности $\gamma$ для двухсторонних непараметрических толерантных интервалов определяют из неравенства

$$NP_д^{(N-1)} - (N-1)P_д^N < 1-\gamma.$$

Для односторонних непараметрических толерантных границ наименьшие целые значения $N$ должны удовлетворять неравенству

$$P_д^N < 1-\gamma.$$

Приведенные неравенства однозначно связывают границы интервала распределения выходного параметра с характером их распределения и тремя параметрами – $P_д$, $\gamma$ и $N$ – для любого закона распределения.

Интервал $\Delta Y_j$ значений $(Y_{j\min}, Y_{j\max})$, полученный в процессе стохастического моделирования, соответствует заданной доверительной вероятности $P_д$ со статистической надежностью $\gamma$ (табл. 2).

Многократно повторяя случайный выбор параметров модели в интервалах их распределений, получим статистический ряд случайных реализаций деталей, поверхности которых сформированы в выбранной технологии.

Обрабатывая полученную в результате моделирования статистику, получим оценку геометрических параметров, в пределах которых находятся (определяются) взаимное расположение и отклонения формы реальных сопрягаемых поверхностей детали с отклонениями формы реальных поверхностей, положение центра масс, массы и параметры тензора инерции в системе координат детали.

Полученная статистика может служить основой для обоснования выбора допусков на геометрические параметры деталей и технологии формирования реальных поверхностей детали разными технологическими методами.

---

Ряда – математическое ожидание; центральный момент второго порядка – дисперсию.

*Таблица 1*

**Графическое отображение законов распределения случайной величины**

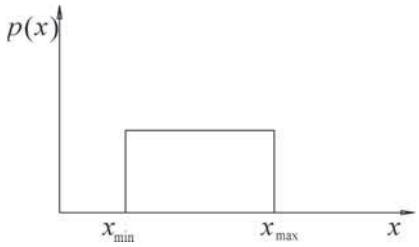
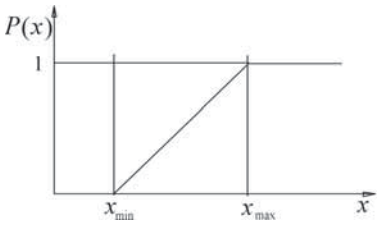
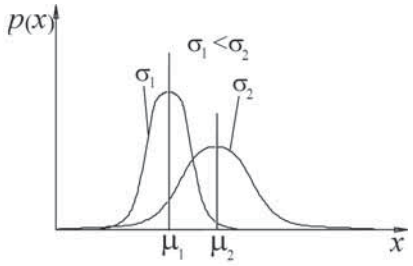
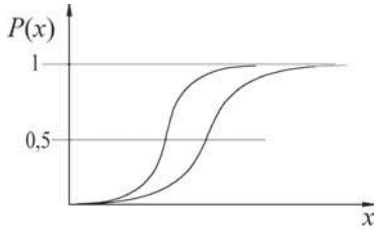
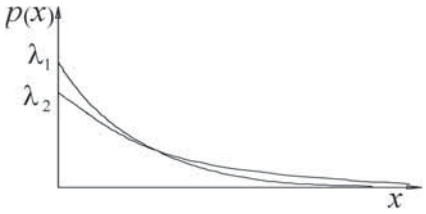
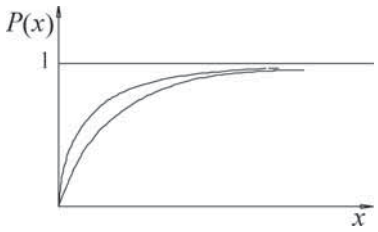
| Закон | $p(x)$ | $P(x)$ |
|---|---|---|
| Равновероятный<br>$p(x) = \begin{cases} 1/(x_{max} - x_{min}) & \text{при } x_{min} \le x \le x_{max} \\ 0 & \text{при } x < x_{min} \\ 0 & \text{при } x > x_{max} \end{cases}$<br>$P(x) = (x - x_{min})/(x_{max} - x_{min})$ |  |  |
| Нормальный Гаусса<br>$p(x) = e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \Big/ \sigma\sqrt{2\pi}$<br>$P(x) = \Phi\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)$ |  |  |
| Экспоненциальный<br>$p(x) = \lambda e^{-\lambda x}$<br>$P(x) = e^{-\lambda x} = e^{-x/\bar{x}}$ |  |  |

*Таблица 2*

**Число реализаций *N* для определения доверительных границ непараметрических толерантных интервалов при различных сочетаниях значений $P_д$ и γ**

| Доверительная вероятность $P_д$ | Статистическая надежность γ при непараметрическом интервале | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | двухстороннем | | | | одностороннем | | | |
| | 0,9000 | 0,9500 | 0,9900 | 0,9973 | 0,900 | 0,9500 | 0,9900 | 0,9973 |
| 0,7500 | 13 | 18 | 24 | 29 | 9 | 11 | 17 | 21 |
| 0,8000 | 18 | 22 | 31 | 37 | 11 | 14 | 21 | 27 |
| 0,9000 | 38 | 46 | 64 | 78 | 22 | 29 | 44 | 57 |
| 0,9500 | 77 | 93 | 130 | 159 | 45 | 55 | 90 | 116 |
| 0,9900 | 388 | 473 | 662 | 809 | 230 | 299 | 459 | 589 |
| 0,9973 | 1140 | 1756 | 2456 | 3006 | 852 | 1109 | 1704 | 2188 |

## Выводы

*1. Разработанные схемы алгоритмов детерминированных моделей формирования реальной поверхности и детали учитывают геометрические параметры формирования реальных поверхностей детали применяемыми технологическими методами. Показано, что формирование детерминированной модели реальной геометрии детали наиболее целесообразно производить сборкой реальных поверхностей (surface методом), учитывающим погрешности их расположения в системе координат базы и технологию формирования каждой поверхности. Такой подход обеспечивает не только геометрические параметры смоделированных деталей, но и геометрию масс каждой из них.*

*2. Показано, что для вероятностной модели детали наилучшим методом является стохастическое моделирование методом Монте-Карло. Для него определены законы генерирования случайных величин параметров детерминированной модели на основании теорем К. Шеннона, обеспечивающих "оценку сверху" – наибольший интервал рассеяния выходных параметров детали по известным статистическим экспериментальным данным (размах, дисперсия, математическое ожидание). На основании непараметрических толерантных интервалов определено количество реализаций стохастического моделирования, обеспечивающее заданную доверительную вероятность и статистическую надежность результата моделирования.*

## Библиографический список


1. **Кашуба Л.А.** Геометрия изделий машиностроения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 10; 2012. № 1.

2. **Мюллер П., Нойман П., Шторм Р.** Таблицы по математической статистике / Пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1982. 278 с.

3. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 512 с.

4. **Шеннон К.** Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 830 с.

**ОБРАБОТКА ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ:** справочник

**С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе**

2010. – 344 с. ISBN 978-5-94275-521-8 **Цена 600 р.**

Рассмотрены современные конструкции инструментов для обработки глубоких отверстий. Даны рекомендации по их проектированию, изготовлению и эксплуатации. Приведены сведения о технологии обработки глубоких отверстий, используемых станках и приборах для контроля глубоких отверстий.

Предназначен для технологов и конструкторов машиностроительных предприятий, а также студентов вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 62-567.7

**С.Н. Чернявский, Т.В. Безрукова, М.Г. Кристаль,** *д-р техн. наук*
*(Волгоградский государственный технический университет)*
*E-mail: crysmar@mail.ru*

# Устройство для ротационной сборки роликовых подшипников

*Предложена новая конструкция автоматической ротационной сборки радиальных роликовых подшипников, исключающая появление резонансных явлений при вращении сборочного приспособления, в момент равенства угловой скорости вращения частоте собственных колебаний сборочного устройства, нарушающих нормальное течение сборочного процесса. Это достигается подключением и отключением дополнительной жесткости подвески колебательной системы, реализуемой при помощи кольцевого электромагнита и системы управления им, при помощи которых меняется жесткость сборочного устройства.*

*The automatic assembly rotating radial roller bearings new design, eliminating the appearance of resonance phenomena in rotating jig, at the time of equality the angular velocity and the natural frequency at the assembly unit that violate the normal course of process. This is accomplished by connecting and disconnecting the additional damping the oscillating system, implemented by means of an annular electromagnet and control them by means of which changes the stiffness of device.*

**Ключевые слова:** автоматическая сборка, роликовый подшипник, ротационная сборка, резонанс, гироскопический момент, частота собственных колебаний.

**Keywords:** automatic assembly, roller bearing, rotary assembly, resonance, gyroscopic moment, the natural frequency.

При автоматической сборке радиальных роликовых подшипников с пластиковыми или металлическими сепараторами наиболее рационально использовать устройство, конструкция которого предложена в работе [1]. Основные стадии процесса автоматической сборки подшипника приведены на рис. 1.

На первом этапе в базовое приспособление *1* устанавливают наружное кольцо *2* подшипника (рис. 1, *а*). Затем во внешнее кольцо *2* (рис. 1, *б*) укладывают сепаратор *3* и ролики *4* (рис. 1, *в*). Запрессовка роликов *4* в окна сепаратора *3* происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращении базового приспособления с угловой скоростью ω, $F_ц = m\omega^2 R$ ($m$ – масса ролика, $R$ – радиус от оси до центра масс ролика).

После установки внутреннего кольца *5* под некоторым углом (рис. 1, *д*) в подсобранный подшипник (рис. 1, *г*) за счет вращения возникает гироскопический момент $L_г$, который приводит к совмещению оси внутреннего кольца подшипника с осью последнего [2]. В обоих случаях используется вращение базовой детали вокруг ее оси. Поскольку запрессовка роликов происходит неравномерно по одному из имеющихся к моменту достижения той или иной угловой скорости вращения наименьшему значению диаметра и наибольшему размеру окна сепаратора, то при вращении сборочного устройства присутствует дисбаланс, приводящий к возникновению паразитной вибрации.

Для исключения этого недостатка сборочное приспособление с турбинным приводом подвешено относительно корпуса на группе плоских пружин, что позволяет при работе в зарезонансном режиме обеспечить чистое вращение. Однако при разгоне и достижении требуемого гироскопического момента $L_г$ при

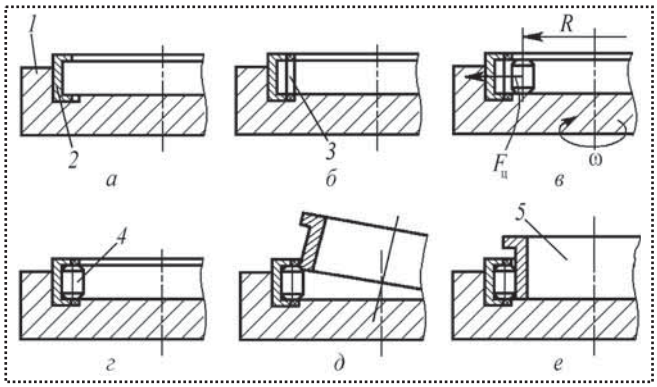



**Рис. 1. Этапы автоматической сборки радиального роликового подшипника**

угловой скорости вращения сборочного приспособления

$$\omega > \sqrt{gf|\bar{r}_c|}\Big/(2\rho_x^2 - \rho_z^2)(1-f)\sin\theta_0,\ \text{рад/с},$$

в момент равенства угловой скорости вращения частоте собственных колебаний упругоподвешенного сборочного устройства, возникают резонансные явления, исключающие нормальное протекание сборочного процесса.

В приведенной формуле приняты обозначения: $g$ – ускорение свободного падения, м/с$^2$; $f$ – коэффициент трения скольжения между материалами сопрягаемых деталей; $r_c$ – радиус-вектор положения центра масс вала относительно точки пересечения осей сопрягаемых поверхностей, м; $\rho_x$, $\rho_z$ – радиусы инерции вала относительно главных осей его эллипсоида инерции, м; $\theta_0$ – начальный угол наклона оси охватываемой детали относительно оси охватывающей поверхности, рад.

Для устранения этого недостатка в конструкцию устройства для сборки, содержащее базовое приспособление *1* (рис. 2), закрепленное на валу *13*, с размещенными на нем пневматическими турбинами разгона *2* и торможения *3*, вращающимся в опорах *5*, которые установлены на упругих пружинных подвесах *4* относительно корпуса *9*, вводят электромагнит. Электромагнит состоит из кольцевого сердечника *7*, катушки с обмоткой *8* и соосно с ним расположенного якоря *6*, закрепленного на нижней опоре *5*.

Устройство управления питанием обмотки *8* содержит датчик *14*, измеряющий угловую скорость вращения вала *13*, задающее *12* и сравнивающее *11* устройства, а также электронный ключ *10* в цепи питания обмотки *8*. При этом кольцевой сердечник *7* установлен на корпусе с возможностью вертикального перемещения для регулировки зазора *s* между кольцевым сердечником *7* и якорем *6*, который закреплен на нижней поверхности опоры вращения *5*, а выходы с датчика *14* и задающего устройства *12* соединены с входом сравнивающего устройства *11*, выход которого соединен с входом электронного ключа *10*, что обеспечивает выключение питания обмотки *8* при достижении валом *4* заданного значения угловой скорости вращения.

Устройство работает следующим образом.

В начальный момент времени электронным ключом *10* обмотка *8* электромагнита подключается к цепи питания постоянным током. Затем подачей струи сжатого воздуха на лопатки турбины *2* разгона

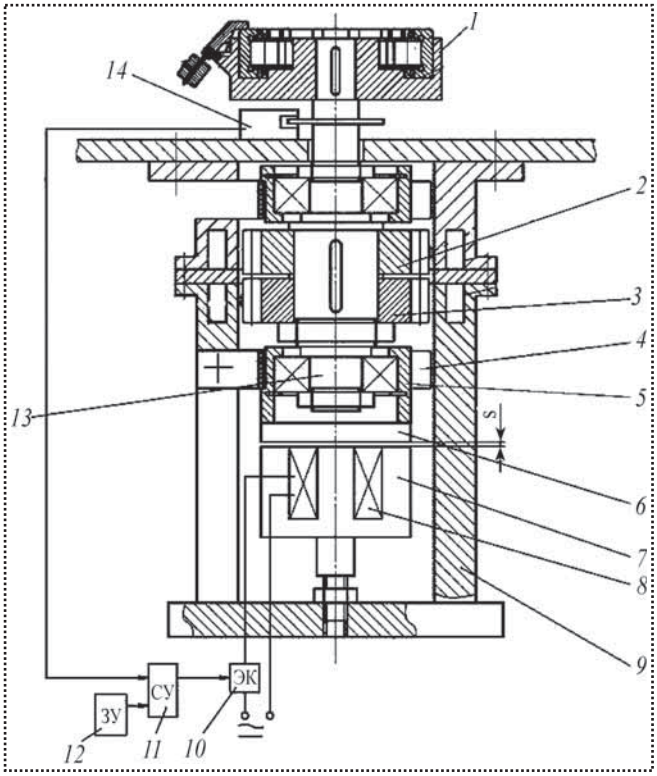



**Рис. 2. Устройство для сборки радиальных роликовых подшипников**

вал *13* приводится во вращение. Одновременно от задающего устройства *12* на вход сравнивающего устройства *13* поступает сигнал со значением угловой скорости, равной $\gamma\omega_0'$, где $\gamma < 1$ – коэффициент отношения заданного значения величины угловой скорости вращения $\omega$ к круговой частоте $\omega_0'$ собственных колебаний подвешенной на упругих подвесах *4* суммарной массы сборочного приспособления *1* с валом *13*, турбинами разгона *2* и торможения *3* и опорами вращения *5* в механизме вращения. На другой вход сравнивающего устройства *11* поступает сигнал от датчика *14*. При достижении угловой скорости $\omega$ вращения вала *13* значения, равного $\gamma\omega_0'$, на выходе сравнивающего устройства *11* вырабатывается сигнал, приводящий к отключению электронным ключом *10* цепи питания обмотки *8*. В результате чего колебательная система сборочного приспособления оказывается в зарезонансном режиме, необходимом для эффективной сборки (рис. 3).

При торможении на вход сравнивающего устройства *11* (см. рис. 2) от задающего устройства *12* поступает сигнал со значением угловой скорости, равной

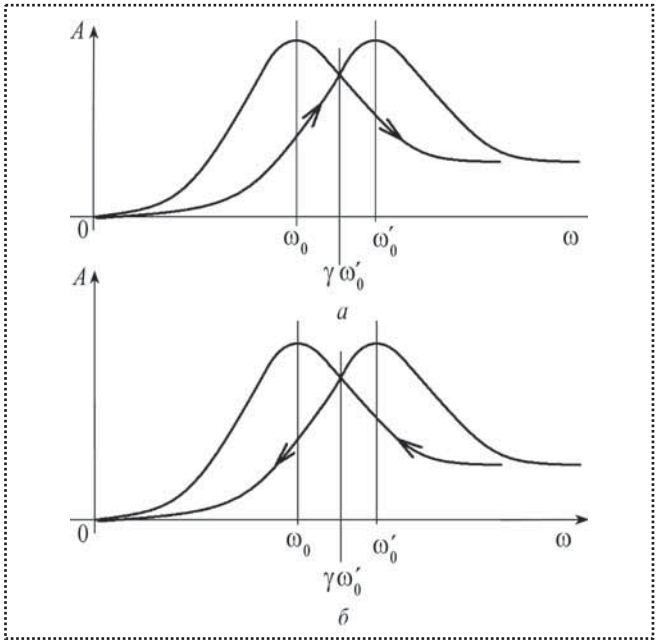



**Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики сборочного приспособления при его разгоне (*а*) и торможении (*б*)**

$\gamma\omega_0'$, а на другой его вход от датчика *14* поступает сигнал со значением угловой скорости $\omega$ вала *13*.

При достижении валом *13* угловой скорости, равной значению $\gamma\omega_0'$, на выходе сравнивающего устройства *11* вырабатывается сигнал, приводящий к подключению электронным ключом *10* обмотки *8* к питанию, что приводит к увеличению частоты собственных колебаний описываемой системы и исключает резонансные явления, приводящие к недопустимым значениям амплитуды колебаний сборочного приспособления.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет обеспечить вращение сборочного приспособления с собираемыми деталями в зарезонансном режиме, что исключает влияние дисбаланса вращающихся масс на возникновение паразитной вибрации с большой амплитудой и обеспечивает необходимые условия для надежного выполнения ротационной сборки изделий.

### Библиографический список

1. **Пат. РФ № 2239735.** Устройство для сборки радиальных роликовых подшипников / М.Г. Кристаль, Е.В. Стегачев, А.В. Широкий // Б.И. 2004. № 31.

2. **Пат. РФ № 2423217.** Способ сборки деталей типа "вал–втулка" / М.Г. Кристаль, С.С. Серов, Т.В. Безрукова // Б.И. 2011. № 19.

**МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ:** *учебник в 2-х т.*

Колл. авт. под ред. **В.В. Бушуева**

2011. Т. 1. 608 с., Т. 2. 584 с. ISBN 978-5-94275-593-5 **Цена 1500 р.**

**В 1-м томе** приведены сведения о современных станках, их классификация, технико-экономические показатели, критерии работоспособности и общие принципы проектирования станков. Описаны методы формообразования, особенности построения рациональных кинематических схем и компоновок, конструкции и классификация основных узлов и механизмов станков, таких как базовые детали, направляющие, главный привод и привод подачи, механизмы транспортирования заготовок, инструмента, стружки и т.п. Рассмотрены режимы смазывания, смазочные системы и материалы. Даны основы математического моделирования и расчета основных подсистем и узлов станков, особенности систем управления.

**Во 2-м томе** описаны станки основных групп (токарных, фрезерных, расточных, сверлильных, шлифовальных, зубообрабатывающих, многоцелевых, агрегатных и др.), а также автоматические линии и ГПС. Рассмотрены станки для водоабразивной, сверхточной, сверхскоростной обработки и станки с параллельной кинематикой. Освещены тенденции развития станков. Приведены основные сведения об испытаниях, эксплуатации, модернизации и ремонте оборудования.

Учебник хорошо иллюстрирован схемами, рисунками, таблицами, что улучшает восприятие материала и позволяет использовать его при реальном конструировании.

Для студентов конструкторских и технологических специальностей и может быть использован инженерно-техническими работниками машиностроительных предприятий и проектных организаций.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.757

**Ю.З. Житников,** *д-р техн. наук, профессор,* **И.В. Житникова,** *аспирант*
*(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)*
*E-mail: kgta_tms@mail.ru*

# Ручные одношпиндельные гайковерты на основе муфт предельного момента повышенной точности осевых сил затяжки

*Описан ручной одношпиндельный гайковерт прямого действия с электромеханической системой контроля точности осевых сил затяжки по углу поворота шпинделя, что позволило повысить точность затяжки резьбовых соединений почти в 4 раза.*

*It is described manual single-spindle screwdriver direct action with the electromechanical monitoring system of accuracy of axial forces of an inhaling on a corner of turn of a spindle that has allowed to raise accuracy of an inhaling of carving connections almost in 4 times.*

**Ключевые слова:** гайковерт, кинематическая схема, точность, осевая сила, затяжка.

**Keywords:** screwdriver, kinematical scheme, accuracy, axial force, inhaling.

**В** работе [2] было обосновано, что повысить точность осевых сил затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами на основе муфт предельного момента можно только за счет осуществления контроля процесса затяжки по углу поворота шпинделя.

Обоснуем структурную схему управления процессом сборки резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами.

Установлено, что только комбинированный способ обеспечения и контроля качества сборки резьбовых соединений гарантирует высокое качество [1]. При комбинированном способе необходимо на этапе предварительной затяжки контроль вести по моменту, а на этапе окончательной затяжки – по углу поворота резьбовой детали.

Следовательно, за основу контроля качества сборки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами примем комбинированный способ.

Для упрощения системы управления и контроля процессами: предварительной затяжки – при высокой скорости вращения шпинделя и малом крутящем моменте, окончательной затяжки – при малой скорости вращения шпинделя и высоком крутящем моменте введем в гайковерте две кинематические цепи передачи вращения к шпинделю.

При достижении на шпинделе требуемого значения момента предварительной затяжки должно произойти переключение кинематической цепи быстрого вращения на тихоходную кинематическую цепь окончательной затяжки с малой угловой скоростью, но высоким крутящим моментом. Одновременно должна включиться система контроля угла поворота шпинделя гайковерта.

Так как при контроле предварительной затяжки резьбовых соединений по моменту возникают погрешности до 20 % от этого значения, то момент не должен превышать 10 % от номинального значения момента окончательной затяжки.

В работе [1] установлено, что для достижения высокой точности осевых сил затяжки резьбовых соединений в процессе предварительной затяжки частота вращения шпинделя $n \le 60$ мин$^{-1}$, а при окончательной затяжке $n < 15$ мин$^{-1}$.

Введем обозначения:

ЗУ – задающее устройство частоты вращения и крутящего момента двигателя;

$U$ – напряжение питания двигателя;

$U_{упр}$ – управляющее напряжение двигателя;

$W_{дв}(p) = \dfrac{M_{дв}}{U_{упр}}$ – передаточная функция двигателя по моменту $M_{дв}$;

$g = \begin{cases} 1 & \Delta\alpha > 0 \\ 0 & \Delta\alpha \le 0 \end{cases}$ – функция управления напряжением питания двигателя;

$J_б$, $J_т$ – передаточные отношения быстроходной и тихоходной кинематических цепей;

$F_1 = \begin{cases} 1, & S < S_0 \\ 0, & S \ge S_0 \end{cases}$ – функции включения тихоходной кинематической цепи;

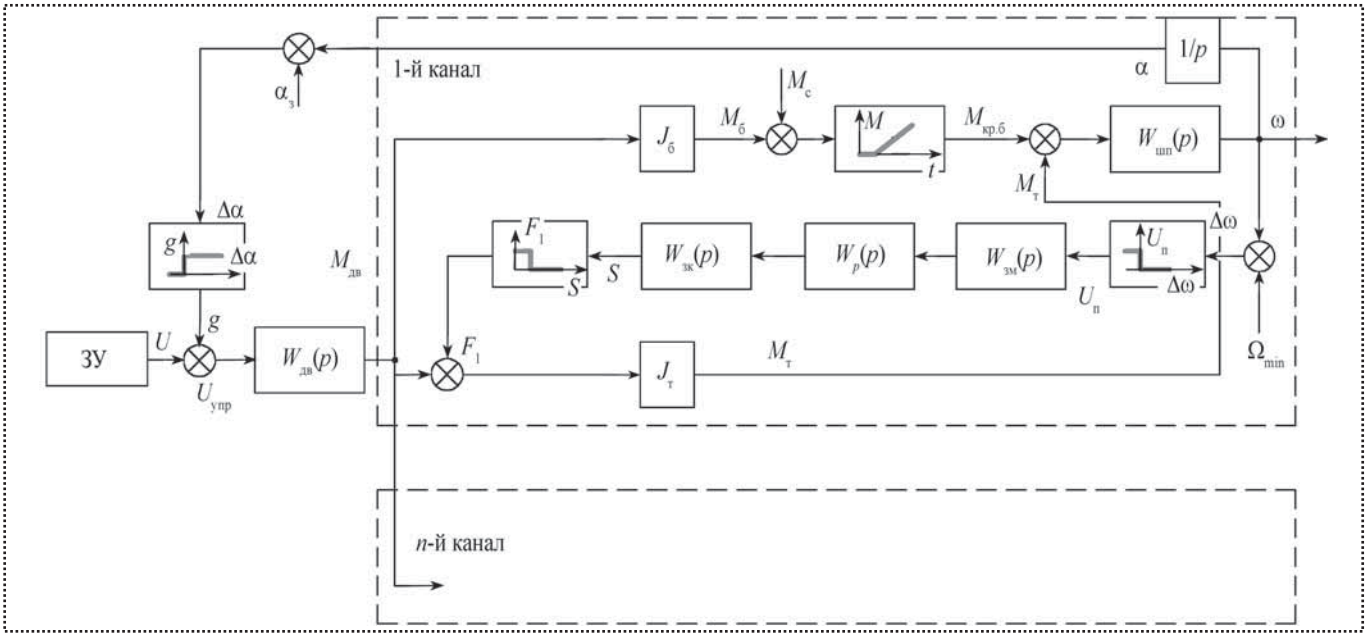



**Рис. 1. Структурная схема адаптивной электромеханической системы управления процессом сборки резьбового соединения одношпиндельным гайковертом**

$S$ – перемещение элемента механизма при переключении кинематических цепей вращений;

$S_0$ – значение перемещения $S$, при котором происходит переключение кинематических цепей;

$M_б$, $M_т$ – моменты в быстроходной и тихоходной кинематических цепях;

$M_с$ – момент сопротивления движению в быстроходной кинематической цепи, вызываемый сопротивлением при взаимодействии вращающихся элементов гайковерта и резьбовых деталей;

$W_{зк}(p) = \dfrac{F_р}{S}$ – передаточная функция элемента механизма переключения вращений;

$F_р$ – усилие воздействия рабочего органа на механизм переключения вращений;

$W_p(p) = \dfrac{F_р}{F_{эм}}$ – передаточная функция рабочего органа на механизм переключения вращений;

$F_{эм}$ – усилие двигателя механизма переключения вращений;

$W_{эм}(p) = \dfrac{F_{эм}}{U_п}$ – передаточная функция двигателя механизма переключения вращений;

$U_п$ – напряжение питания двигателя механизма переключения вращений, $U_n = \begin{cases} U_n, & \Delta\omega \le 0 \\ 0, & \Delta\omega > 0 \end{cases}$ – функция включения механизма переключения вращений;

$M_{кр.б}$ – крутящий момент быстроходной кинематической цепи, $M_{кр.б} = f(\Delta M)$,

$f(\Delta M) = \begin{cases} 0 & \Delta M > \Delta M_{пр} \\ \Delta M & \Delta M \le \Delta M_{пр} \end{cases}$; $\Delta M = M_б - M_с$ – управляющий момент;

$W_{шп}(p) = \dfrac{\omega}{M}$ – передаточная функция механизма вращения шпинделя;

$M = M_{кр.б} + M_т$;

ω – угловая скорость вращения шпинделя;

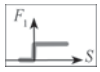
$\Delta\omega = \omega - \Omega_{min}$ – управляющий параметр угловой скорости вращения;

$\Omega_{min}$ – минимальная скорость вращения двигателя механизма переключения вращений, при которой происходит включение;

α – угол поворота шпинделя;

$\alpha_з$ – заданный угол поворота шпинделя, при окончательной затяжке;

$\Delta M_{пр}$ – погрешность момента предварительной затяжки;



– датчики переключения вращений;

$\boxed{1/p}$ – устройство преобразования сигнала (интегратор);

⊗ – устройство сложения сигналов.

С учетом сказанного структурная схема управления процессом сборки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами имеет вид, представленный на рис. 1.

Упростим схему управления и преобразуем ее.

Функции системы управления обеспечением и контролем требуемого момента предварительной затяжки резьбовых соединений и отключения вращения быстроходной, но маломоментной кинематической цепью вращения может выполнить муфта предельного момента зубчатого (кулачкового) типа.

Функции механизма переключения вращений с быстроходной, но маломоментной кинематической цепи вращения на тихоходную, но высокомоментную может выполнить механизм, состоящий из подвижной шестерни, которая вводится в зацепление рычагом, приводимым в движение оператором.

Функцию рычага может выполнять курок одношпиндельного гайковерта.

На основании структурной схемы управления одношпиндельным гайковертом и введения механических аналогов системы управления предлагается кинематическая схема одношпиндельного гайковерта на основе планетарного редуктора, зубчатых передач, муфты предельного момента и механизма переключения вращений (рис. 2).

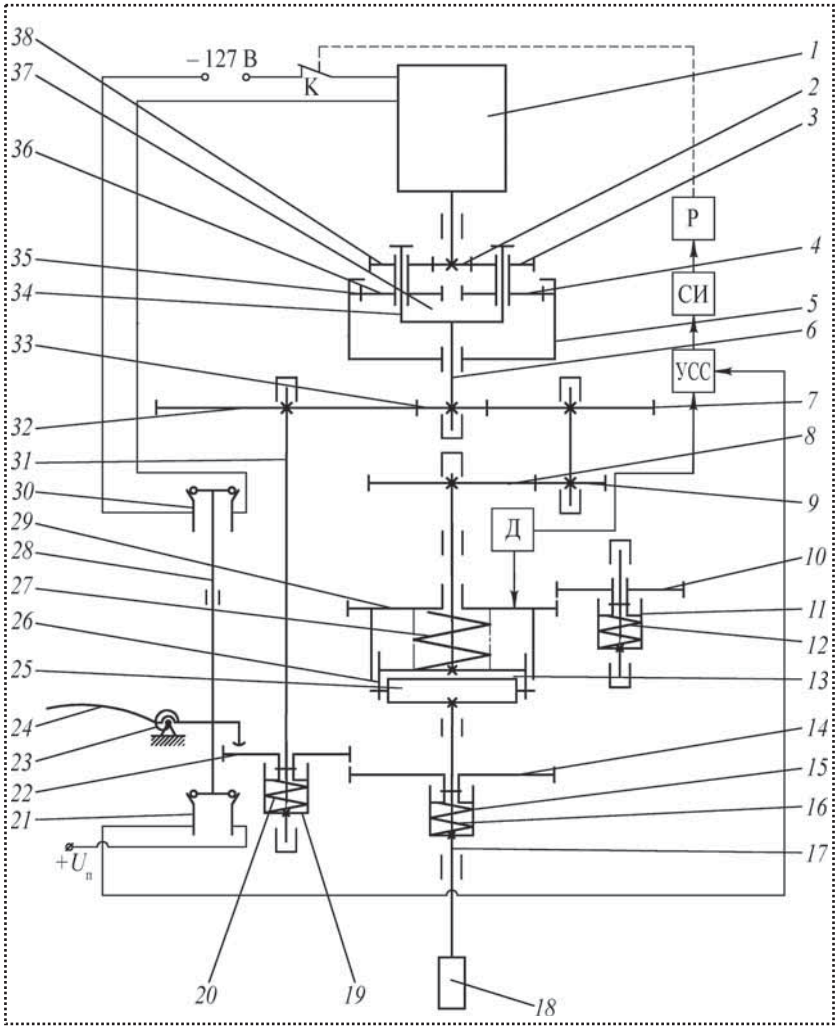



**Рис. 2. Одношпиндельный гайковерт на основе электропривода, планетарного редуктора, муфты предельного момента и механизма переключения вращений**

Гайковерт состоит из двигателя *1* (электрического или пневматического), планетарного редуктора *37*. Редуктор представляет собой корпус *5*, в котором размещены входная шестерня *2*, взаимодействующая с колесами *3* и *38*, выполненными за одно целое – колесо *3* с шестерней *4*, а колесо *38* с шестерней *36*. Шестерни *4* и *36* начинают перекатываться по колесу *35* с внутренним зацеплением. Осями сдвоенных шестерен и колес являются оси, выполненные заодно с водилом *6*. На ось водила *6* жестко насажена центральная шестерня *33*, взаимодействующая с двумя колесами *7* и *32*, обеспечивающими разделение вращений по быстроходной, но маломоментной кинематической цепи вращения и тихоходной, но высокомоментной.

По тихоходной цепи вращение от шестерни *33* передается на колесо *7*, далее через зубчатую пару *9*, *8* на ось муфты предельного момента *13*. Муфта состоит из крышки *29*, обеспечивающей регулирование поджатия пружины *27*, которая обеспечивает требуемый момент срабатывания. На ободе муфты нарезаны зубья, необходимые для регулировки момента срабатывания за счет введения в зацепление шестерни *10* под действием пружины *12* в стакане *11* при ручной настройке. Имеется ведущая – подвижная, перемещающаяся вдоль оси вала полумуфта *26* и неподвижная, жестко закрепленная на валу – ведомая полумуфта *25*. Ось неподвижной полумуфты переходит в шпиндель *17*, на котором расположен патрон-вставка *18* для удержания резьбовой детали при завинчивании и затяжке.

Вращение по тихоходной, но высокомоментной цепи от шестерни *33* передается на колесо *32*, жестко сидящее на валу *31*, на втором конце которого расположена подвижная, поджатая пружиной *20* со стаканом *19* шестерня *22*. При взаимодействии курка (рычага) *24*, поджатого пружиной кручения *23*, подвижная, вращающаяся шестерня *22* входит в зацепление с подвижным колесом *14*, поджатым пружиной *16* из стакана *15*. Подпружинивание шестерни и колеса позволяет шестерне *22* после прекращения взаимодействия с курком возвращаться в исходное положение, а подпружинивание колеса *14* исключает резкое воз-

растание сопротивления и даже "утыкание" зубьев при входе шестерни *22* в зацепление с колесом *14*. Колесо *14* вращает шпиндель *17* и патрон *18*.

Одношпиндельный гайковерт работает следующим образом. Предварительно патрон захватывает резьбовую деталь. Оператор слегка нажимает на курок *24*. Перемещается шток *28*, замыкая контакты *30* в цепи питания электродвигателя *1*. Начинает вращаться ось электродвигателя и вращение через шестерню *2* передается сдвоенным шестерням-колесам *3*, *4* и *38*, *36* планетарного редуктора *37*. Колеса *4* и *36* перекатываются по неподвижному колесу *35*, имеющему внутреннее зацепление. Учитывая, что оси сдвоенных шестерен-колес составляют водило *34*, то вращение передается на выходной вал *6*. На валу *6* жестко насажена центральная шестерня *33*, вращение от которой идет по двум кинематическим цепям. По тихоходной, но высокомоментной кинематической цепи вращение от шестерни *33* передается колесу *32*, валу *31* и подпружиненной шестерне *22*. Но шестерня *22* не находится в зацеплении с подвижным колесом *14*, поэтому дальнейшее вращение по этой кинематической цепи не передается. Одновременно с тихоходной кинематической цепью вращение от шестерни *33* передается колесу *7* и далее через зубчатую пару *9*, *8* на ведущую полумуфту *26* муфты предельного момента *13*. Подвижная полумуфта зубьями связана с неподвижной (ведомой) полумуфтой *25* и вращение передается на шпиндель *17* и патрон *18* гайковерта. Происходит завинчивание и предварительная затяжка резьбового соединения. Как только момент сопротивления в резьбовых соединениях достигает момента, на который настроена муфта предельного момента, что соответствует моменту предварительной затяжки, подвижная полумуфта начнет проскальзывать относительно неподвижной за счет перемещения вдоль вала, не передавая вращение. Муфта предельного момента обеспечила момент предварительной затяжки. Шпиндель гайковерта остановится.

Оператор нажимает на курок сильнее, что обеспечивает перемещение вдоль оси вала подвижной шестерни *22*, которая войдет в зацепление с подпружиненным колесом *14* и на шпиндель начнет передаваться вращение по тихоходной, но высокомоментной ветви вращения. Начнется процесс окончательной затяжки. Одновременно при перемещении курка *24* переместится шток *28* и замкнутся контакты *21* в цепи контроля угла поворота резьбовой детали. При перемещении крышки *29* вместе с подвижной полумуфтой *26* вдоль оси вала при каждом взаимодействии зубьев полумуфт муфты предельного момента *13* замыкается контакт датчика (Д) и отсчитываются импульсы, соответствующие углу поворота каждого зуба муфты. Сигнал попадает в устройство согласования сигналов (УСС), далее в счетчик импульсов (СИ), настроенный на требуемое число импульсов, соответствующее требуемому углу затяжки. При достижении требуемого числа импульсов срабатывает реле (*Р*), которое размыкает нормально замкнутый контакт (К) в цепи питания электродвигателя. Электродвигатель остановится. Процесс затяжки резьбового соединения завершен. Оператор отпускает курок, размыкаются контакты *30* и *21*, подвижная шестерня *22* выходит из зацепления подвижного колеса *14*. Гайковерт и система управления приведены в исходное положение.

Обоснуем погрешности осевых сил затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами на основе муфт предельного момента.

На этапе предварительной затяжки возникает суммарная погрешность

$$\delta Q^{\text{пр}} = \sqrt{\delta Q_{\omega}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{м}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{к}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{р}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{м.с}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{м.п.м}}^{\text{пр}^2}} + \delta Q_{\text{н}}^{\text{пр}} + \delta Q_{I}^{\text{пр}}. \quad (1)$$

В формуле (1) обозначены:

а) случайные погрешности от:

- $\delta Q_{\omega}^{\text{пр}}$ – нестабильности угловых скоростей вращения шпинделей гайковертов и нестабильности вращений выходных валов приводов;
- $\delta Q_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – нестабильности крутящих моментов на шпинделях и нестабильности моментов вращения выходных валов приводов;
- $\delta Q_{\text{к}}^{\text{пр}}$ – кинематических погрешностей в передаточных механизмах гайковертов;
- $\delta Q_{\text{р}}^{\text{пр}}$ – нестабильности моментов сопротивления в резьбовых соединениях;
- $\delta Q_{\text{м.с}}^{\text{пр}}$ – нестабильности моментов сопротивления в передаточных механизмах гайковертов;
- $\delta Q_{\text{м.п.м}}^{\text{пр}}$ – нестабильности срабатывания муфт предельного момента;

б) систематические погрешности от:

- $\delta Q_{\text{н}}^{\text{пр}}$ – неточности настройки муфт предельного момента;
- $\delta Q_{I}^{\text{пр}}$ – приведенных моментов инерции вращающихся элементов механизмов гайковертов в цепи предварительной затяжки к осям шпинделей.

На этапе окончательной затяжки возникает суммарная погрешность:

$$\delta Q^{\text{о}} = \sqrt{\delta Q_{\text{рд}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\omega}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{м.с}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{к}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{из}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{м}}^{\text{о}^2}} + \delta Q_{\text{н}}^{\text{о}} + \delta Q_{I}^{\text{о}}. \quad (2)$$

В формуле (2) обозначены:

а) случайные погрешности от:

• $\delta Q^{o}_{р.д}$ – нестабильности параметров резьбовых деталей;

• $\delta Q^{o}_{\omega}$ – нестабильности угловой скорости вращения шпинделя;

• $\delta Q^{o}_{м.с}$ – нестабильности моментов сопротивления в передаточных механизмах гайковертов;

• $\delta Q^{o}_{к}$ – кинематических погрешностей в передаточных механизмах гайковертов;

• $\delta Q^{o}_{из}$ – погрешностей измерения углов поворота резьбовых деталей электромеханической системой контроля;

• $\delta Q^{o}_{м}$ – нестабильности крутящих моментов на осях шпинделей;

б) систематические погрешности от:

• $\delta Q^{o}_{н}$ – неточности настройки гайковерта на требуемое значение осевой силы затяжки;

• $\delta Q^{o}_{I}$ – величины приведенных моментов инерции вращающихся элементов гайковертов в цепи окончательной затяжки к осям шпинделей.

Оценка влияния перечисленных параметров (1) и (2) на точность осевых сил затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами позволила установить, что суммарная погрешность от влияния существенных факторов

$$\delta Q_{\Sigma} = \sqrt{\delta Q^{пр^2}_{р} + \delta Q^{пр^2}_{м.п.м} + \delta Q^{o^2}_{р.д} + \delta Q^{o^2}_{из}} + \\ + \delta Q^{пр}_{н} + \delta Q^{o}_{н}. \quad (3)$$

Расчеты суммарных погрешностей осевых сил затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами повышенной точности показали, что они при следующих осевых силах предварительной затяжки равны:

• $Q^{пр} = 5$ % от $Q^{o}$ – $\delta Q_{\Sigma} \approx 4{,}2$ %;

• $Q^{пр} = 7{,}5$ % от $Q^{o}$ – $\delta Q_{\Sigma} \approx 5{,}1$ %;

• $Q^{пр} = 10$ % от $Q^{o}$ – $\delta Q_{\Sigma} \approx 6{,}2$ %.

Экспериментальные исследования затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами повышенной точности подтвердили расчетные значения с погрешностями не более 20 %.

## Вывод

*Разработаны ручные одношпиндельные гайковерты на основе муфт предельного момента повышенной точности осевых сил затяжки резьбовых соединений. Погрешности не превышают 6,5 % от номинальных значений осевых сил затяжки.*

## Библиографический список

1. **Житников Ю.З., Житникова И.В.** Анализ погрешностей моментов затяжки одношпиндельных гайковертов на основе муфт предельного момента // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 8. С. 12–16.

2. **Воркуев Д.С., Житников Ю.З.** Разработка семейства высокоточных многошпиндельных гайковертов нового класса на основе одного привода / под общ. ред. Ю.З. Житникова. М.: Машиностроение, 2009. 204 с.

**АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА:** справочник

**И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев**

2010. – 352 с.: ил. ISBN 978-5-94275-522-5 **Цена 700 р.**

Содержит данные об основных видах современных абразивных инструментов, выборе их характеристик и подготовке к эксплуатации. Для наиболее распространенных способов абразивной обработки приведены рекомендации по режимным параметрам, применяемому оборудованию и технологической оснастке, смазывающим технологическим средствам, оценке эксплуатационных свойств инструментов. Учтены изменения в стандартах, произошедшие в последние годы.

Предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторов и технологов, студентов и преподавателей высшего и среднего профессионального образования.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.791.048

**В.В. Карабанов,** *канд. техн. наук,* **И.О. Бохоров,** *инженер*
*Тел.: 8-498-520-3472*

# Реактивные процессы при пайке

*Рассмотрены процессы контактного плавления различных металлов при контактно-реактивной, контактно-флюсовой и контактно-газовой пайке, процесс образования интерметаллидов. Приведены оптимальные условия пайки при этих процессах.*

*The process of contact melting of various metals in contact-reactive, contact-flux and contact-gas soldering, the formation of intermetallic compounds, are the optimal conditions for soldering these processes.*

**Ключевые слова:** контактно-реактивный процесс, контактно-флюсовая пайка, контактно-газовая пайка, пары металлов, диффузионный процесс, интерметаллиды.

**Keywords:** kontakt-jet process, a kontakt-flux soldering, a kontakt-gas soldering, steams of metals, diffusive process, intermetallic.

Расплав припоя может образовываться в результате атомного взаимодействия в области контакта разнородных металлов при температуре их плавления или ниже нее. Возникновение жидкой прослойки между контактирующими металлами возможно, если на их диаграмме состояния имеется минимум или они образуют эвтектический сплав при взаимодействии. Процесс образования жидкого сплава из контактирующих металлов называется контактно-реактивным плавлением, а способ пайки – контактно-реактивной пайкой.

В основе контактного плавления металлов лежат диффузионные процессы. Диффузия наиболее активно протекает в сторону металла, обладающего большей растворяющей способностью. Диффузия атомов может продолжаться до тех пор, пока концентрация диффундирующего элемента в поверхностном слое не достигнет его содержания в эвтектике, определяемой диаграммой состояния. При достижении металлами температуры, соответствующей эвтектической, или минимума на линии солидуса в системах, образующих непрерывные твердые растворы с минимумом, начинается образование жидкой фазы [8].

Вначале в зоне образования твердого раствора образуются отдельные устойчивые зародыши (5...10 мкм), которые по мере их диффузионного роста сливаются в тонкую пленку на границе контакта. Дальнейшее взаимодействие металлов происходит через образовавшуюся пленку расплава. Одновременно протекают два процесса: образование твердого раствора в поверхностных слоях обоих металлов за счет диффузии из жидкой фазы и растворение образующегося твердого раствора в жидкой фазе.

При благоприятных условиях процесс контактно-реактивного плавления начинается скачкообразно и протекает чрезвычайно быстро. После смачивания твердого металла образовавшимся жидким сплавом происходит его растворение в нем и переход его атомов в остальной объем жидкой фазы. Переход атомов твердого металла в жидкий сопровождается встречным диффузионным процессом – диффузией атомов жидкой фазы в твердую. При достижении на поверхности и в глубине твердого металла (до 10 см) предельной растворимости создаются условия для перехода пограничного слоя из твердого состояния в жидкое.

Процесс растворения регулируется не подводом компонентов жидкой фазы к границе фаз, а более медленным процессом отвода их от границы за счет диффузии в твердом растворе. Поэтому скорость контактно-реактивного плавления взаимодействующих металлов определяется диффузией в жидкой и твердой фазах с учетом их взаимодействия [8]. Направление контактно-реактивного процесса прямо противоположно направлению растворно-диффузионного процесса. Увеличение времени выдержки ведет не к исчезновению жидкой фазы, как это имеет место при растворно-диффузионном процессе, а к возрастанию ее количества.

На границе растущей жидкой прослойки образуются расплавы различного состава, между которыми протекает активный диффузионный процесс по перераспределению диффундирующих элементов по объему прослойки. Процесс насыщения и плавления твердого металла будет непрерывно продолжаться. В связи с устойчивым градиентом концентрации компонента жидкой фазы в твердом металле и диффузионным перемещением его внутрь паяемого металла становится невозможной изотермическая кристаллизация жидкой прослойки, что является особенностью этого процесса.

Если контактно-реактивный процесс проводится при температуре выше температуры эвтектического расплава, то при кристаллизации расплава в процессе охлаждения образуется избыточная фаза в виде твердого раствора, отлагающегося на поверхностях взаимодействующих металлов.

Контактное плавление некоторых металлов может происходить при их нагреве ниже эвтектической точки, что обусловлено саморазогревом контактной зоны металлов в результате диффузионного синтеза интерметаллических соединений. В этих случаях металлы должны нагреваться до момента контактирования, либо скорость их нагрева должна быть достаточно велика.

Такой характер нагрева может быть применен при контактном плавлении никеля с алюминием, образующим эвтектику ($T_{пл}$ = 640 °С) и ряд интерметаллидов. Интенсивное контактное плавление таких элементов может происходить при температуре 520 °С. Температура контактного плавления для некоторых пар металлов может быть на 150 °С ниже эвтектической точки.

Введение в контактируемые металлы легирующих элементов может замедлить или ускорить процесс контактного плавления [9]. Увеличение числа компонентов в контактирующих металлах увеличивает время наступления контактного плавления, которое может протекать в стационарном и нестационарном режимах. При стационарном режиме под действием постоянного давления происходит непрерывное удаление образуемой жидкой фазы и толщина прослойки поддерживается постоянной. При нестационарном режиме толщина жидкой прослойки с течением времени постоянно возрастает вследствие непрерывного растворения контактирующих металлов. Обычно процесс контактной пайки ведут в стационарном режиме. При нестационарном режиме процесс продолжается до израсходования одного из металлов. При расположении более плотного металла сверху контактируемой пары скорость контактного плавления возрастает в 2–10 раз.

Если контактируемые металлы образуют несколько эвтектик с различными температурами плавления, за температуру пайки принимают температуру плавления такой эвтектики, при которой обеспечиваются более качественные паяные соединения.

Так, титан с медью образует три эвтектики с температурами плавления 920, 980 и 1030 °С. При температуре плавления первой эвтектики не обеспечивается надежность паяных соединений, при температурах свыше 1030 °С происходит значительная эрозия паяемых металлов. Поэтому пайку осуществляют при температуре плавления второй эвтектики, при которой содержание элементов соответствует соотношению 50 на 50 %.

Скорость перемещения межфазной границы в процессе плавления зависит не только от коэффициента диффузии, но и от содержания металла, которое должно быть достаточным при диффузии в твердый металл, чтобы стало возможным возникновение жидкой фазы, т.е. оно должно немного превышать его содержание в эвтектике [4].

Так, при контакте оловянного и свинцового покрытий при температуре 200 °С движение границы на оловянном покрытии в 10 раз превышает скорость перемещения границы на свинцовом покрытии, несмотря на обратное соотношение коэффициентов диффузии этих металлов. Согласно диаграмме состояния олово–свинец при 200 °С, содержание олова в свинце, при котором начинается контактное плавление, составляет 19 %, а свинца в олове – 2 %. Это и объясняет более высокую скорость перемещения границы жидкой фазы в сторону оловянного покрытия.

Для использования процесса контактно-реактивного плавления при пайке однородных металлов между ними помещают прокладки или на паяемые поверхности наносят покрытия гальваническим или термовакуумным путем, образующие с паяемым металлом или между собой эвтектику или минимум на диаграмме состояния металлов. Эти же приемы используют для ограничения толщины образующейся жидкой фазы.

Процесс контактно-реактивного плавления при пайке может продолжаться как угодно долго с непрерывным растворением паяемого металла с постоянной скоростью. Как правило, образующаяся прослойка является хрупкой, поэтому необходимо регулировать развитие процесса плавления. Выбирая толщину прокладки или покрытия, можно предотвратить интенсивное растворение паяемого металла и точно регулировать количество жидкой фазы, что особенно важно при пайке тонкостенных изделий (например, теплообменников). На практике принимают толщину жидкой фазы в пределах 0,25...0,35 мм. Толщину прокладки или покрытия выбирают с учетом содержания металла в эвтектике и количества жидкой фазы, необходимой для заполнения зазора и образования требуемых галтелей. С учетом этих требований успешно осуществляют пайку меди, латуни, алюминия через тонкую прокладку серебра, а пайку бронзы БрХ08 со сталями Х18Н10Т, ЭИ811 (12Х21Н5Т) через марганцовое покрытие толщиной 10...30 мкм.

Уменьшение толщины жидкой фазы обеспечивает повышение прочности и пластичности. Так, при пайке магниевого сплава МА8 изменение толщины жид-

кой прослойки с 0,10 до 0,02 мм приводит к повышению прочности в 3 раза.

Основными факторами, регулирующими процесс контактно-реактивного плавления являются: температура пайки, время, давление, толщина образующегося расплава. Относительно большая скорость образования жидкой фазы и ее высокая смачивающая способность позволяют проводить пайку некоторых материалов при достаточно быстром нагреве без флюса, на воздухе или в слабо окислительной атмосфере. В этих условиях пайки готовые припои аналогичного эвтектического состава обычно плохо смачивают или вообще не смачивают паяемый металл. Образующаяся жидкость, проникая через несплошности в оксидной пленке, быстро покрывает и смачивает паяемый металл, отрывая и разрушая оксидную пленку. С увеличением числа компонентов, составляющих многокомпонентную эвтектику, возрастает время до возникновения контактно-реактивного плавления.

Эвтектика не является простой механической смесью фаз, она обладает свойствами, отличными от свойств образующих ее металлов и от свойств рядом расположенных по составу сплавов. Эвтектика обладает более высокой коррозионной стойкостью.

Перечень пар металлов, образующих эвтектические смеси или твердые растворы с минимальной температурой плавления, приведены в источнике [9]. К ним относятся такие сочетания металлов, как Al–Zn, Cd–Be, Al–Si, с температурой плавления эвтектик соответственно 382, 144 и 577 °С. Марганец образует с медью и никелем непрерывные ряды твердых растворов, имеющих минимум на диаграмме состояния, соответственно 868 и 1018 °С. Марганец является полиморфным металлом с аллотропными фазами, превращение которых происходит с наличием теплового гистерезиса. Нагрев деталей производится при нанесении покрытия (напыления), до температуры, близкой к существованию модификации (изоморфной с решеткой меди), что и обеспечивает прочное сцепление слоя марганца за счет диффузионных процессов.

Марганец широко применяется в качестве компонента припоя для контактно-реактивной пайки медных сплавов и коррозионно-стойких сталей. На одну из соединяемых деталей марганец наносится вакуумной металлизацией, напылением или гальваническим способом. Пайку покрытых марганцем деталей проводят в аргоне с применением трехфтористого бора в вакууме с остаточным давлением 1...20 Па, с давлением на детали 0,1...0,5 МПа [11].

С использованием марганцевого покрытия производят контактно-реактивную пайку железомедных тонкостенных теплообменников. Толщина жидкой прослойки, образуемой при пайке, зависит не только от толщины прослойки марганца, но и от скорости нагрева при нестационарном режиме. При достижении температуры пайки происходит легирование железом медномарганцевой фазы, в результате образуется припой, обеспечивающий высокую прочность соединения меди со сталью.

Контактное плавление меди и марганца происходит с большой скоростью, значение которой обратно пропорционально квадратному корню из времени контактирования металлов. Оптимальная толщина образуемого в соединении переходного слоя составляет 12...16 мкм [15].

Для соединения различных металлов используют припои в виде многослойной ленты, состоящей из слоев различных компонентов, вступающих в контактно-реактивное плавление при нагреве. Такие ленты могут быть использованы при вакуумной контактно-реактивной пайке твердых сплавов со сталью [5]. Ленточные припои получают путем испарения и конденсации компонентов припоя в вакууме на медную, никелевую или железную фольгу толщиной 0,02...0,15 мм, с двух сторон. Очередность нанесения компонентов на фольгу зависит от химической активности и упругости пара компонентов. Компонент с высокой упругостью пара наносится последним.

При контактно-реактивной пайке труднопаяемых коррозионно-стойких сталей между собой и другими металлами используют многослойные покрытия из меди, марганца и никеля. Качество и работоспособность паяных соединений в основном определяются правильным выбором температуры пайки. Нижний температурный предел устанавливается исходя из анализа диаграммы состояния сплава Cu–Mn, а верхний предел – исходя из структурных изменений, протекающих в паяемом металле при воздействии термического режима [6]. Трудности пайки коррозионно-стойких сталей с применением готовых припоев на основе системы Cu–Mn и Cu–Mn–Ni заключаются в образовании химически и термически стойких оксидных пленок на основе легирующих элементов паяемых сталей, а также в высокой чувствительности указанных сталей к нагреву.

В момент контактного плавления жидкая медномарганцевая фаза находится в более активном состоянии, чем готовый припой того же состава, поэтому она разрушает оксидные пленки на поверхности соединяемых металлов и при давлении на детали они удаляются из зазора вместе с избыточным количеством жидкой фазы. Наличие избыточного количества жидкой фазы обеспечивается если ее толщина будет превышать высоту неровностей соединяемых поверхностей.

Для снижения термического напряжения при пайке твердого сплава со сталью из-за различия коэффициентов линейного расширения увеличивают толщи-

ну слоя припоя или компенсационных прокладок из малоуглеродистой стали, железоникелевых сплавов и др. Сердцевина ленточного припоя не плавится при пайке и служит термодемфирующей прокладкой. Толщина слоя марганца в ленточном припое составляет 45...55 мкм, меди – 100 мкм. Максимальная прочность паяных в печи соединений достигается при температуре пайки 1000 °С с выдержкой 5 мин.

При монтаже трубопроводов из тонкостенных труб (15×1,5 мм), изготовленных из алюминиево-магниевого сплава, проводилась контактно-реактивная пайка с использованием медного покрытия. В соответствии с диаграммой состояния системы Al–Mg–Cu при нагреве в результате диффузионного процесса между основным металлом и покрытием при 507 °С образуется жидкая фаза эвтектического состава, выполняющая роль припоя. Пайка проводилась в среде аргона, подаваемого в камеру, установленную на стыке. Толщина покрытия составила 5...10 мкм, время нагрева 80 с. Прочность паяного соединения при толщине шва до 1,5 мм составляла 580...700 МПа [13].

Процесс контактного плавления двух разнородных металлов может использоваться не только для их соединения, но и для резки на части одного из них – наиболее легкоплавкого металла [9]. Такой способ резки алюминиевых заготовок разработан с применением в качестве резака медного элемента. Прижатие резака к алюминиевой заготовке и углубление ее в образующуюся при нагреве жидкую фазу с удалением ее в процессе перемещения резака по контуру резки обеспечивает разъединение алюминиевой заготовки на части.

Припой или его основа может образоваться при пайке не только в результате контактно-реакционного процесса между металлами, но и при получении одного из них из флюса в результате восстановления или диссоциации одного из его компонентов. В результате реактивно-флюсового процесса на паяемый металл осаждается свободный металл, который смачивает его и служит припоем или, осаждаясь в виде покрытия на паяемых металлах, облегчает процесс пайки при использовании готового припоя. Вытесненный металл должен иметь температуру плавления ниже температуры пайки. Только при этом условии он может служить припоем или активно смачивать паяемый металл, контактно расплавлять его под оксидной пленкой и, диспергируя ее, облегчать растекание готового припоя по поверхности и затекание его в зазор.

Необходимые компоненты реактивных флюсов – соли, чаще всего хлориды металлов. Сравнительная активность различных металлов представляется так называемым электрохимическим рядом напряжений: Li, K, Rb, Ca, Na, Mg, Be, Al, Zn, Mn, Nb, Cr, Ga, Fe, Cd, In, Co, Ni, Mo, Sn, Cu, Hg [9].

В этом ряду каждый металл способен вытеснять из солей все другие металлы, расположенные правее его в ряду напряжений. При выборе компонентов реактивных флюсов для пайки различных металлов можно пользоваться этим рядом.

Наиболее широкое распространение в качестве одного из компонентов флюсов нашли хлориды металлов, содержание которых во флюсах достигает 90 %. При пайке титана, алюминия и магния используют хлориды меди, никеля, олова, цинка и др.

Важную роль в формировании паяного шва при реактивно-флюсовой пайке выполняет процесс восстановления оксидной пленки паяемых металлов и оксидов, входящих в состав флюсов, водородом, который образуется при разложении гидридов, а также растворение оксидной пленки фторидами. В состав реактивных флюсов входят: растворители, ингибиторы коррозии, катализаторы химических реакций и вещества для удаления продуктов реакций.

Наиболее широко реактивно-флюсовый процесс применяется для соединения деталей из алюминия и его сплавов. Основу флюсов составляют хлориды цинка, олова, кадмия и других легкоплавких металлов, хорошо смачивающие оксидную пленку алюминия, проникая под нее и взаимодействуя с алюминием [8, 9]:

$$2Al + 3ZnCl_3 = 2AlCl_3 + 3Zn.$$

Хлористый алюминий, являющийся газообразным веществом, при температурах свыше 183 °С способствует разрушению оксидной пленки, которая одновременно растворяется во фториде натрия. Металлический цинк, осаживаясь на чистой поверхности алюминия, вступает с ним в контактное плавление, образуя сплав, состав которого отвечает линии ликвидуса равновесной диаграммы состояния системы Al–Zn при температуре плавления. Для предотвращения эрозии алюминия хлориды цинка во флюсе заменяют хлоридами кадмия и олова или снижают его содержание во флюсе до 1 %. Увеличение хлорида кадмия во флюсе улучшает смачиваемость припоем паяемой поверхности, что особенно важно при пайке трудно паяемых сплавов – алюминиевых бронз и нержавеющих сталей (например, Х18Н10Т).

Повышение прочности паяного соединения при использовании реактивных флюсов обеспечивается за счет снижения пористости и легирования паяного шва осаждаемыми из флюса металлами – цинком, кадмием и др.

Аналогичными свойствами с высокой растворимостью алюминия обладает широко известный флюс для пайки алюминия и его сплавов – флюс 34А.

**Флюсы для пайки низколегированных конструкционных сталей**

| Номер флюса | Содержание компонентов, %, не более | | | | | Площадь растекания, мм$^2$ | Сопротивление срезу, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Вода | Глицерин | Хлорид меди | Хлорид олова | Хлорид кадмия | | |
| 10 | 44,8 | 44,8 | 0,4 | 10,0 | – | 450 | 62,5 |
| 16 | 40,0 | 40,0 | 0,8 | 9,6 | 9,6 | 650 | 67,0 |
| 25 | 40,5 | 40,5 | – | 5,0 | 10,0 | 170 | 61,0 |
| 30 | 38,0 | 38,0 | 3,2 | 4,5 | 9,0 | 180 | 64,0 |

Примечание. Во флюс № 25 вводили 4 % соляной кислоты, а во флюс № 30 вводили 1,7 % соляной кислоты, 3...4 % хлористого цинка.

Процесс взаимодействия паяемого металла с компонентами реактивных флюсов протекает с выделением теплоты. Процесс изотермической реакции развивается настолько быстро и бурно, с выделением газообразных продуктов, что в короткий срок эррозия металла превращает сечение прутка из квадратного в круглое. В связи с повышенной активностью реактивных флюсов в них добавляют соли металлов, не восстанавливаемых в этих условиях пайки.

С целью снижения реакционной активности флюсов для пайки низколегированных конструкционных сталей со всеми припоями на основе олова, свинца, кадмия, создан ряд наиболее жидкотекучих и жизненно-стойких флюсов, представленных в таблице [9].

Флюс № 16 более активен, чем флюс № 10, что объясняется заменой слоя олова, осаждаемого на поверхность металлов слоем Sn–Cd, по составу, близкому к эвтектике, который способствует растеканию оловянно-свинцовистого припоя.

Пайка осуществляется в интервале температур 220...380 °С как обычными припоями. Технология пайки с использованием флюсов № 10 и № 16 отличается от обычной пайки только необходимостью непродолжительной выдержки флюса на паяемой поверхности в течение 5...10 с, для чего она подогревается. Выдержка необходима для полного осаждения металла на поверхность, остатки продуктов флюсования удаляются промывкой холодной и горячей водой.

Детали из сплавов алюминия, содержащих свыше 2 % магния не могут соединяться известными способами пайки в виду образования на их поверхности химически стойкого оксида магния, который не диссоциирует в аргоне, в вакууме или в активных газовых средах. Флюс для пайки алюминиевых сплавов типа АМ2 и АМ5 должен содержать достаточное количество хлорида цинка, который способствует удалению оксидной пленки. Таким флюсом является флюс 214 ($ZnCl_2$ – 22,5 %, $LiCl_2$ – 57,5, NaF – 10, LiF – 10 %). Концентрация хлорида цинка во флюсе подобрана исходя из обеспечения оптимальной толщины осаждающейся на поверхности металла пленки цинка – 4...6 мкм. При температуре пайки 590...620 °С необходима выдержка [3]. При пайке с использованием флюса 214, по сравнению с флюсом 34А, улучшается смачиваемость, повышается прочность паяных соединений за счет повышения плотности паяного шва и его легирования. В состав реакционных флюсов при пайке железа вводят оксиды меди, марганца, никеля, которые при восстановлении образуют припой. В качестве восстановителей применяют гидриды. Оксиды и гидриды меди, марганца, цинка, лития, бария, алюминия, магния и натрия подбирают таким образом, чтобы при сравнительно низкой температуре они вступали в реакции восстановления. В результате экзотермической реакции образуются чистые металлы, свободный водород и оксиды металлов.

Для пайки коррозионно-стойких сталей, на поверхности которых образуются стойкие оксидные пленки хрома, можно применять флюс № 25, содержащий до 4 % соляной кислоты, которая обеспечивает удаление этой пленки.

Для пайки твердосплавных пластинок, содержащих карбиды титана, предложен флюс, содержащий, % мас.: $NaHF_2$ – 48, $CoF_2$ – 30, $NiF_2$ – 10, $MoO_3$ – 12. В процессе нагрева в этом флюсе кобальт, никель и молибден легко восстанавливаются до металлического состояния и сплавляются с паяемой поверхностью. Фторид натрия очищает поверхность от оксидов, жира и загрязнений. Фторид олова (кадмия, цинка) защищает частицы карбидов в твердосплавных пластинах от окисления в процессе нагрева и способствует растеканию припоя.

Реактивно-флюсовый процесс обеспечивает эффективное решение многих сложных задач техники пайки. Применение при высокотемпературной пайке медных алюминиевых сплавов и сталей реактивных флюсов позволяет управлять физико-технологиче-

скими свойствами и другими качественными характеристиками паяных соединений.

Если при реактивно-флюсовой пайке один из компонентов припоя, образующегося при нагреве, поступает из флюса, то при контактно-газовом процессе один из компонентов припоя конденсируется из паровой фазы, образующей одновременно и защитную среду при пайке изделий в замкнутом объеме (контейнере) [12]. Реактивно-газовый процесс образования расплава припоя при пайке протекает между парами металла и паяемыми материалами, металлической прокладкой между ними или заготовками припоя, уложенными между ними при капиллярной пайке [8].

В этих условиях становится возможным получение припоя во время термического процесса пайки за счет насыщения исходной заготовки элементом из паровой фазы, а также изменять или сохранять состав припоя путем легирования его из паровой фазы, что особенно важно при использовании припоев, содержащих легкоиспаряемые элементы, например при пайке сталей латунями [1, 7].

Этот процесс осуществим обычно при печном нагреве в вакууме или в инертном газе, в которых возможно испарение металлов, способных химически адсорбироваться на поверхности твердых металлов, взаимодействуя с ними и понижая температуру их плавления в насыщенном парами слое. Необходимые условия осуществления такого процесса те же, что и для контактно-реактивного плавления: способность испаряющегося металла образовывать с паяемым металлом или металлом покрытия, прокладками или заготовками припоя – легкоплавкие эвтектики и растворы с минимальной температурой плавления, а также возможность ведения процесса пайки при температурах выше температуры плавления соответствующей эвтектики или легкоплавкого твердого раствора.

Для проведения реактивно-газового процесса могут быть использованы металлы с достаточно высоким давлением паров (висмут, цинк, кадмий, магний, литий и др.), интенсивно окисляющиеся на воздухе. Поэтому пайка в парах металлов и неметаллов возможна прежде всего без свободного доступа воздуха и влаги (в замкнутом объеме). Наибольшее количество влаги и кислорода в невысоком вакууме или в проточных газовых средах, нейтральных по отношению к паяемым металлам и технологическим материалам, связывается парами легкоиспаряющихся элементов при нагреве под пайку. Таким образом, пары металлов дополнительно очищают рабочее пространство контейнера или печи.

При выборе газообразующего металла необходимо избегать применения таких металлов, которые образуют с паяемым металлом стойкие химические соединения (интерметаллиды). Среди металлов с высоким давлением паров имеются такие, которые не образуют хрупких интерметаллидов с важнейшими конструкционными материалами – железом, медью, алюминием или образуют интерметаллиды, стойкие до температур ниже температуры пайки. С железом не образуют интерметаллидов висмут, кадмий, марганец. Сурьма не образует их с железом выше температуры 1200 °С, а пары цинка – выше 782 °С [9].

Исследования подтвердили возможность пайки сталей в парах марганца и цинка, с применением в качестве заготовки припоя меди. Возможна пайка алюминия в парах висмута, кадмия, цинка и алюминиевых сплавов в парах магния.

При пайке сталей медью в парах марганца с повышением температуры взаимодействия предельная растворимость марганца и твердой меди в жидкой фазе Cu–Mn резко снижается, а скорость отвода марганца вглубь меди резко возрастает. Вместе с этим увеличивается масса марганца, наносимого на поверхность меди.

С появлением жидкой фазы пары марганца переходят в нее в процессе адсорбции, что приводит к дополнительному контактному плавлению меди в жидкой фазе и отводу марганца в медь. Поэтому с повышением температуры и времени контакта меди с парами марганца растет толщина жидкого слоя, но уменьшается толщина слоя твердого раствора в меди.

При пайке стали 20 в парах марганца с порошком меди, уложенным у зазора, достаточно высокая прочность паяного шва на срез (420...450 МПа) может быть обеспечена при нахлесточном соединении с перекрытием 2 мм и режимах пайки: 970 °С с выдержкой 25 мин или при 990 °С при выдержке 15 мин. При использовании смеси порошков меди и никеля (5 %), при том же перекрытии нахлесточного соединения, необходимо повышение температуры пайки. Высокое сопротивление срезу (450...480 МПа) получено на соединениях из стали 12Х18Н9Т, паяных смесью порошков меди и никеля (10 %) по режиму: 1010...1030 °С с выдержкой 15 мин.

При использовании цинка при контактно-газовой пайке образующиеся в замкнутом объеме в процессе нагрева пары цинка создают активную паяльную атмосферу, пригодную для безфлюсовой пайки углеродистых сталей, так как в парах цинка не происходит окисления железа и легирующих элементов.

Путем изменения давления паров цинка в контейнере можно регулировать его содержание в латуни. При пайке в других атмосферах происходит интенсивное испарение цинка из латуни, что ухудшает формирование шва и снижает механические свойства соединений. Другой вариант регулирования воздейст-

вия паров цинка и получения заданного содержания в припое – изменение температуры испарения цинка. Пайку в парах цинка проводят при температуре 950 °С с выдержкой 3...5 мин. Припой помещают у паяльного зазора [14].

При пайке узлов из алюминиевых сплавов в качестве парообразующего металла применяют магний [2]. В процессе пайки происходит интенсивное испарение магния, пары которого связывают кислород в рабочем пространстве печи, а образующуюся газообразную окись магния удаляют из печи. С уменьшением содержания кислорода и увеличением парциального давления паров магния создаются условия для восстановления алюминия парами магния из его оксида на поверхности изделия. В результате происходит адсорбция паров магния на поверхность алюминия с образованием легкоплавкой жидкой фазы, которая, растекаясь по оксидной пленке, разрушает и удаляет ее из паяного зазора. В момент плавления и растекания образованного припоя образуется паяное соединение.

Высокая прочность и пластичность соединений могут быть обеспечены, если пары металлов образуют с заготовкой припоя растворы с низкой температурой плавления или простые эвтектики, как, например, при взаимодействии меди, никеля или железа с парами марганца; олова – с парами цинка; меди – с парами лития, цинка.

При реакционно-газовом процессе важное значение имеет дозированное поступление паров металла к поверхности паяемого металла, время и температура контакта. Эти параметры процесса определяют соотношение скоростей подвода газа к контактной поверхности и отвода его атомов вглубь твердого металла.

В паяльном производстве широко используются пары магния для пайки алюминиевых сплавов припоями типа силумин, и пары марганца для пайки сталей с медью.

На разработке, совершенствовании и внедрении прогрессивной парофазной технологии пайки специализируется кафедра "Оборудование и технология пайки" Тольяттинского политехнического университета.

В соответствии с диаграммой состояния металлических систем многие металлы при взаимодействии образуют химические (интерметаллические) соединения – интерметаллиды.

Особенностью металлических химических соединений по сравнению с металлическими сплавами является температура их плавления, превышающая температуру плавления наиболее тугоплавкого компонента. В химическом соединении разноименные атомы связаны друг с другом в кристаллической решетке преимущественно металлической связью, фиксирующей, в отличие от металлических твердых растворов, постоянное (стеихиометрическое) отношение атомов в соединении, и имеют индивидуальную металлическую решетку, в которой разноименные атомы располагаются упорядоченно. Сила химической связи между разноименными атомами в металлических соединениях значительно превышает силу связи разноименных атомов в твердых растворах.

При пайке интерметаллиды возникают и растут на границе контакта твердого паяемого металла и жидкого припоя, где наиболее интенсивно протекают диффузионные процессы массообмена. После образования сплошной прослойки интерметаллидов продолжается ее рост по толщине, до момента полной кристаллизации припоя. В основном интерметаллидные прослойки представляют собой хрупкие и непрочные включения в паяном шве, которые являются наиболее слабым звеном в паяном соединении. Только немногие интерметаллиды являются прочными и пластичными. К ним относятся: TiCo, TiCu, TiNi. Пределы их прочности составляют 500...600 МПа, удлинение – 10...15 % [14].

Высокая хрупкость интерметаллидных прослоек и значительное отличие их коэффициентов термического расширения от коэффициентов паяемых металлов может вызвать разрушение паяного шва. Только при относительно небольшой толщине этих прослоек, примерно 1 мкм, достигается максимальная прочность паяных соединений на отрыв и срез (при пайке меди оловом, оловянно-свинцовыми припоями).

Во многих случаях взаимодействующие металлы образуют несколько типов химических соединений в виде слоев, растущих с разными скоростями. В первую очередь возникают и растут химические соединения, наиболее богатые легкоплавким металлом (элементом припоя), менее богатые прослойки химических соединений образуются по месту контакта паяемого металла и жидкого припоя в процессе дальнейшей выдержки или при повышении температуры нагрева. На скорость роста толщины прослойки влияет объем жидкого припоя. Рост будет тем больше, чем больше отношение предельной растворимости паяемого металла в жидком припое при температуре пайки к его растворимости при температуре солидуса, т.е. чем больше растворенного металла выделится из жидкого раствора при затвердевании. Так как с увеличением температуры возрастает и предельная растворимость паяемого металла, то при прочих равных условиях рост толщины прослоек будет тем больше, чем выше температура пайки.

Образование химических соединений может происходить как в результате непосредственного диффузионного взаимодействия при температурах сущест-

вования жидкой фазы – припоя, так и в процессе затвердевания припоя (в интервале кристаллизации). При взаимной диффузии сплавов с числом компонентов более двух могут расти многофазные прослойки интерметаллидов.

Температурный интервал существования некоторых металлидов может находиться ниже температуры пайки, тогда при выдержке происходит процесс массопереноса твердого металла в жидкий, а при охлаждении паяного соединения на границе твердой фазы может закристаллизовываться слой интерметаллидов в соответствии с концентрацией элемента, растворившегося в жидкой фазе, и с диаграммой состояния. Образование интерметаллидов при кристаллизации припоя может происходить дополнительно к уже образованным при выдержке температуры пайки.

С образованием сплошного слоя твердых интерметаллидных прослоек тормозится диффузионный процесс на границе взаимодействия паяемого металла и припоя. Теперь взаимная диффузия их элементов протекает через твердую прослойку интерметаллидов, коэффициент диффузии в которой значительно ниже, чем в жидком припое.

Определение скорости роста толщины интерметаллидов определяют на образцах по ГОСТ 21548–76.

В реальных условиях фронт роста интерметаллидов не ограничен плоскостью. Часто по фронту наблюдаются выступы, растущие с большей скоростью, чем средняя скорость роста. Ограничение или предотвращение образования химических соединений в паяных швах при пайке с однородными металлами достигается различными путями.

Торможения процесса образования и роста прослойки интерметаллидов можно добиться путем разбавления припоя элементом, не образующим химических соединений ни с паяемым металлом, ни с припоем. При большом содержании этого компонента припоя (выше критического) будет иметь место торможение образования и роста прослоек, как, например, при пайке меди оловянно-свинцовым припоем. Введение в олово свинца приводит к резкому увеличению периода активизации образования химического соединения $Cu_6Sn_5$ и к торможению его роста, а начиная с содержания свинца 60...70 % предотвращается возникновение интерметаллидов. Эффективное количество свинца, вносимое в припой, зависит от длительности и температуры пайки.

Более эффективно применение оловянно-висмутовых сплавов. Введение в олово 10 % висмута позволяет уменьшить толщину прослойки $Cu_6Sn_5$ (при пайке при температуре 250 °С с выдержкой в течение 30 с она составила 0,5...2,0 мкм). С тем же содержанием одного свинца (без висмута) и при тех же условиях пайки толщина прослойки составляет 7 мкм.

Толщина прослойки интерметаллидов оказывает влияние на свойства паяных соединений, например, при пайке оловом при температуре 280 °С и при полученной толщине прослойки 2 мкм прочность на срез составила 45 МПа, а при толщине прослойки 7 мкм – 34 МПа.

Более резкое торможение образованию и росту интерметаллидов при пайке может быть достигнуто легированием припоя элементом, образующим на границе паяемого металла и жидкого припоя достаточно тонкую прослойку химического соединения, которая нарушает контакт и взаимодействие между ними, но не снижает механических свойств паяных соединений. Образование такой прослойки возможно при условии, что легирующий элемент имеет большее химическое сродство к паяемому металлу, чем к основе припоя. Содержание легирующего компонента должно быть таким, чтобы образуемая прослойка барьерного (интерметаллидного) покрытия, не снижая механических свойств паяных соединений, была достаточной для предотвращения контакта паяемого металла с жидким припоем. При более высоком содержании легирующего компонента (выше оптимального) будет увеличиваться прослойка барьерного интерметаллида, что может привести к ухудшению механических свойств паяного соединения.

На рост интерметаллидной прослойки в контакте меди и жидкого олова может оказать влияние кадмий. Он образует эвтектику с оловом и химическое соединение с медью. При содержании в припое – олове 10 % кадмия при пайке с температурой нагрева 250 °С и выдержке 5...8 с толщина интерметаллидной прослойки составила 1,0...1,7 мкм.

В контакте нержавеющей стали 1Х18Н9Т с жидким алюминием подобные действия на рост интерметаллидных прослоек оказывает добавка кремния, который образует с алюминием эвтектику, а с железом – химическое соединение.

Введение в припой легирующего элемента, имеющего большее химическое сродство с паяемым металлом по сравнению с основой припоя, но не образующего тонкого барьерного слоя интерметаллидов, может привести лишь к усилению роста интерметаллидных прослоек. Подобным образом ведет себя цинк, при пайке меди оловом образуя с медью интерметаллид, а с оловом – эвтектику.

Введение в припой компонентов, входящих с ним в химическое взаимодействие, но не образующего химического соединения с паяемым металлом, должно приводить к снижению скорости роста интерметаллидных прослоек на границе. Типичным примером такого легирующего элемента при пайке меди оловом является серебро. Содержание его в олове порядка

1,0...1,5 % приводит к резкому уменьшению толщины интерметаллидной прослойки.

При пайке металлов и сплавов припоями с основой, не образующей с паяемым металлом химических соединений, особое значение имеет содержание в них примесей и легирующих элементов, способных к образованию таких прослоек. Толщина прослоек химических соединений в швах, паяных такими припоями, зависит от количества примесей и легирующих элементов. Образование таких прослоек возможно лишь начиная с некоторого критического их содержания.

Критическое количество реактивных элементов в припое тем больше, чем меньше их химическое сродство с паяемым металлом. Так, для фосфора и алюминия характерно слабое сродство с медью, цинком, кадмием, образующих большую группу медных припоев, зато они склонны, входя в виде примесей в припой, образовывать при пайке сталей прослойки химических соединений с железом. Во избежание образования прослоек при пайке углеродистых сталей ограничивают в них примеси фосфора до 0,014 % и алюминия до 0,6001 %.

Для предотвращения образования и роста интерметаллидных прослоек в соединениях из одного металла, паяных припоями с критическим содержанием примесей или легирующих компонентов, необходимо дополнительное легирование припоя компонентом, связывающим в химические соединения избыточное (сверхкритическое) количество примесей. Обычно включения таких химических соединений относительно равномерно распределены по шву и не образуют прослоек на границе с паяемым металлом. Примером такого легирования является введение никеля в припой Cu–Zn и другие припои, содержащие примеси алюминия в количествах более критического.

Барьерные покрытия, наносимые на паяемый металл лужением, термовакуумным способом, плакированием или другими методами, устраняющие контакт между паяемым металлом и жидким припоем, хорошо сцепленные с ним и не склонные к образованию химических соединений ни с припоем, ни с паяемым металлом, могут также предотвращать появление в швах интерметаллидных прослоек. При этом паяемым металлом становится металл барьерного покрытия. В большинстве случаев прочность паяного соединения определяется прочностью сцепления барьерного покрытия с паяемым металлом. В некоторых случаях таким покрытием может служить и металл основы припоя.

Требуемая малая толщина интерметаллидной прослойки и жидкого барьерного покрытия может быть получена при достаточно быстром их погружении в расплав или путем выбора металла и толщины покрытия, образующего с паяемым металлом медленно растущие, при температуре пайки, интерметаллидные слои. Примером таких легкоплавких барьерных покрытий при пайке стали алюминиевым припоем являются кадмий, олово, цинк, наносимые на сталь медленным погружением или гальваническим способом. Кадмий образует с алюминием монотектику, с цинком и оловом – эвтектику, бедные алюминием. Кадмий не вступает в химическую реакцию с железом и до температуры 700 °С почти не растворяет его. Олово и цинк образуют с железом ряд интерметаллидов, устойчивых до температуры 780 °С. При погружении стали в жидкое олово, нагретое до 300 °С, интерметаллид растет очень медленно. При достаточно малой толщине покрытия сталей оловом или цинком интерметаллидные прослойки могут быть очень тонкими.

Одним из путей предотвращения появления и роста интерметаллидных прослоек в паяных швах является выбор оптимального режима пайки. Известно, что появление и заметный рост интерметаллидных включений в паяных швах происходит после определенного подготовительного периода активации, в течение которого при заданной температуре в пограничной области происходит накопление диффундирующих элементов до количества, достаточного для образования минимального объема интерметаллидного включения. При проведении процесса пайки за период, не превышающий время подготовительного процесса, интерметаллидных включений в паяном шве не образуется.

Рост интерметаллидного слоя подчиняется параболическому закону и происходит тем интенсивнее, чем выше температура. Изменение длительности инкубационного периода (до появления интерметаллидов) в зависимости от температуры протекает по экспоненциальному закону. Поэтому при разработке технологии пайки необходимо знать длительность периода до появления интерметаллидов при различных температурах и кинетику их роста при различных температурных режимах.

При пайке меди оловом период активации составляет 2...4 с в зависимости от температуры пайки. При контакте титана с жидким алюминием (700...800 °С) период активации составляет соответственно 160 и 25 с [10]. Из приведенных примеров видно, что подготовительный период активации в ряде случаев измеряется секундами, что весьма затрудняет осуществление процесса пайки. При больших значениях энергии активации и низкой температуре пайки подготовительный период может оказаться настолько длительным, что становится соизмеримым с временем пайки, и интерметаллидные прослойки могут не образоваться или иметь достаточно малую толщину.

Образование прослоек интерметаллидов можно предотвратить, проводя пайку при температуре выше температуры их плавления.

С целью расширения периода активации в припой необходимо вносить легирующие компоненты, замедляющие развитие процесса образования интерметаллидов или способствующие образованию на поверхности паяемого металла барьерного покрытия.

Образование и рост интерметаллидных прослоек в паяном шве может происходить при длительной работе паяных соединений при повышенных температурах и приводить со временем к существенному снижению их прочностных характеристик. Иногда предотвращение возникновения интерметаллидных прослоек или образование их, но незначительными по толщине, при пайке не гарантирует от дальнейшего протекания реактивной диффузии при длительной высокотемпературной работе паяных соединений в процессе эксплуатации. Такой рост интерметаллидов наблюдается при эксплуатации соединений из коррозионно-стойких сталей, паяных припоями на основе алюминия.

Существенно снизить или устранить влияние интерметаллидов на механические свойства паяного шва возможно путем изменения формы применяемого припоя. Если при использовании литого припоя на границе спая образуется хрупкий и сплошной слой интерметаллидов, то в этом случае, по возможности, целесообразно применять механическую смесь порошков, составляющих припой компонентов. В этом случае интерметаллиды образуются не в виде сплошного слоя, а лишь в местах контакта частиц соответствующих компонентов и распределяются равномерно по всему объему паяного шва, что приводит к резкому повышению механических свойств паяного соединения.

### Библиографический список


1. **Безфлюсовая** пайка стальных изделий медно-цинковыми припоями. Дисс. ... канд. техн. наук. Киев, 1987.
2. **Безфлюсовая** пайка узлов из алюминиевых сплавов в вакууме // Сварочное производство. 1994. № 11.
3. **Глушко Л.И., Бойко В.Р.** Вопросы пайки металлов с применением реактивных припоев. М., 1984.
4. **Гржимальский Л.Л.** Кинетика низкотемпературной безфлюсовой контактно-реактивной пайки // Сварочное производство. 1988. № 9.
5. **Контактно-реактивная** пайка твердого сплава в вакууме ленточными многокомпонентными припоями / Н.В. Каршин и др. // Сварочное производство. 1975. № 10.
6. **Контактно-реактивная** пайка нержавеющих сталей между собой и с другими металлами / Н.М. Будкин и др. // Сварочное производство. 1971. № 10.
7. **Краснопевцев А.Ю.** Припои, образующиеся в процессе пайки // Сварочное производство. 2010. № 12.
8. **Лашко Н.Ф., Лашко С.В.** Пайка металлов. М.: Металлургия. 1988.
9. **Лашко Н.Ф., Лашко С.В.** Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия. 1977.
10. **Лашко Н.Ф., Лашко С.В.** Вопросы теории и технологии пайки. Саратов, 1974.
11. **Маркович Л.А.** Контактно-реактивная пайка металлов гальваническим марганцем // Сварочное производство. 1986. № 6.
12. **Пайка** сталей с использованием паров активных металлов. Новые достижения в области пайки / Б.Н. Перевезенцев и др. Киев, 1981.
13. **Суслов А.А.** Безфлюсовая пайка алюминиевых трубопроводов в монтажных условиях. Пайка-2000. Тольятти, 2000.
14. **Федоров А.Л.** Парофазная технология контейнерной пайки латунными припоями. Дисс. ... канд. техн. наук. Тольятти, 1997.
15. **Фролов А.А.** Контактно-реактивная пайка меди со сталью через прослойку марганца // Сварочное производство. 1972. № 10.


## ПОПРАВКА

В статье С.В. Зверева "Пайка конструкций из высокопрочных сталей с сотовым наполнителем" (№ 2 за 2012 г.) была пропущена нижеприведенная таблица

**Результаты испытаний паяных соединений и основного материала**

| Флюс | Прочность, МПа | |
|---|---|---|
| | основного материала (сталь ЭП-678) | паяного соединения |
| Фтортитанат калия | 810...860 | 380...420 |
| Фторбарат калия | 810...860 | 320...360 |

УДК 519.85

**Ю.Н. Матросова,** *канд. техн. наук*
*(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)*
*E-mail: kandy2701@mail.ru*

# Программное обеспечение для автоматизированного проектирования типовых технологических процессов деталей "втулка", "вал"

*Представлено разработанное автором программное обеспечение для автоматизированного формирования комплекта технологических карт на детали типа "Вал", "Втулка".*

*Presented by the author developed software for the automated forming a set of technological maps to details such as "Shaft", "Bush".*

**Ключевые слова:** программное обеспечение, технологический процесс, вал, втулка.

**Keywords:** software, technological process, shaft, bush.

**В** машиностроении при изготовлении и сборке изделий сложных форм и конфигураций наиболее часто используемыми элементами сборки являются детали тел вращения – вал и втулка. Данные детали являются типовыми, поэтому целесообразно автоматизировать процесс формирования типовых технологий изготовления валов и втулок.

С этой целью были проведены анализ конструктивных элементов деталей "Втулка" (табл. 1) и "Вал" (табл. 2) и анализ возможных допусков формы и расположения поверхностей [2].

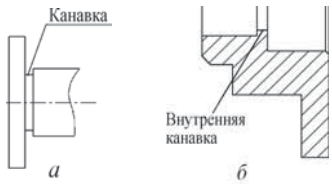
Кроме этого, для расчета режимов резания, подбора режущего инструмента, задания баз и т.д. был проведен анализ методов обработки поверхностей и соответствующих им квалитетов качества и шероховатостей поверхностей.

Автором разработано программное обеспечение для автоматического формирования типовых технологических процессов деталей типа "Втулка", "Вал", алгоритм работы которого приведен на рис. 1 [1].

На начальном этапе работы программы пользователь выбирает тип детали ("втулка" или "вал"). Далее пользователем вводятся основные параметры детали, выбираются параметры конструктивных элементов детали, выбираются необходимые допуски формы и расположения поверхности детали. По окончании ввода данных пользователь запускает кнопку "Расчет". При этом происходит проверка правильности ввода данных. Если она не выполняется успешно, то

*Таблица 1*

**Конструктивные элементы втулок**

| Конструктивный элемент | Эскиз | Характеристики |
|---|---|---|
| Ступень | | Поверхность втулки, характеризующаяся постоянным диаметром |
| Канавка |  | Переходная поверхность между меньшим и большим радиусами втулки, представляющая собой углубление прямоугольной формы |

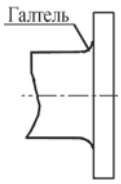
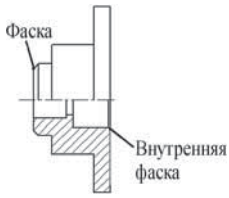
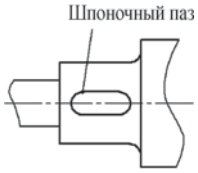
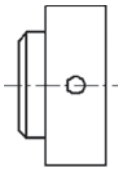
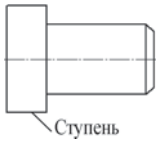
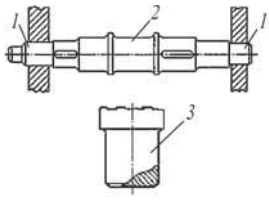
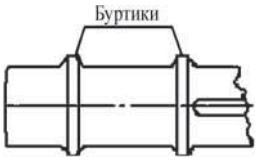
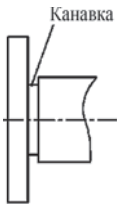
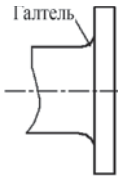
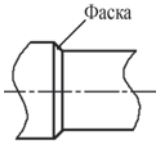
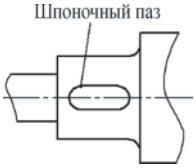
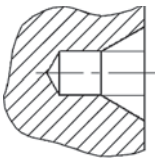
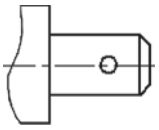
| Конструктивный элемент | Эскиз | Характеристики |
|---|---|---|
| Галтель |  | Переходная поверхность между меньшим и большим радиусами втулки, представляющая собой скругление с постоянным радиусом между меньшим и большим радиусами |
| Фаска |  | Переходная поверхность между меньшим и большим радиусами втулки, представляющая собой коническую поверхность с определенным углом наклона. Также делаются на концах втулки для легкой сборки конструкции |
| Шпоночный паз |  | Паз для установки шпонки |
| Отверстие |  | Отверстие в направлении, перпендикулярном оси втулки. Часто используется для установки штифта |

*Таблица 2*

**Конструктивные элементы валов**

| Конструктивный элемент | Эскиз | Характеристики |
|---|---|---|
| Ступень |  | Поверхность вала, характеризующаяся постоянным диаметром.<br>Валы, состоящие из одной ступени, называют гладкими |
| Цапфа |  | Опорная часть вала. Передает радиальную нагрузку. Различают шип *1* (цапфа на конце вала) и шейку *2* (цапфа в средней части вала). Пятка *3* – опорная часть вала, передающая осевую нагрузку, характерна для вертикально устанавливаемых валов |
| Буртик |  | Кольцевое утолщение, составляющее одно целое с валом. Служит для упора деталей или подшипников |

| Конструктивный элемент | Эскиз | Характеристики |
|---|---|---|
| Канавка |  | Переходная поверхность между меньшим и большим радиусами вала, представляющая собой углубление округлой или прямоугольной формы |
| Галтель |  | Переходная поверхность между меньшим и большим радиусами вала, представляющая собой скругление с постоянным радиусом между меньшим и большим радиусами |
| Фаска |  | Переходная поверхность между меньшим и большим радиусами вала, представляющая собой коническую поверхность с определенным углом наклона. Также обязательно делаются на концах вала для легкой сборки конструкции |
| Шпоночный паз |  | Паз для установки шпонки |
| Центр |  | Отверстие специальной формы в торце вала для возможности его крепления в центрах (например, для шлифования) |
| Отверстие |  | Отверстие в направлении, перпендикулярном оси вала. Часто используется для установки штифта |

выводится сообщение об ошибке и программа возвращается на начальный этап.

После успешной проверки правильности ввода данных последовательно происходит определение типов обработки поверхностей для каждого конструктивного элемента детали, расчет межоперационных размеров и припусков на обработку, определение маршрута обработки, выбор оборудования для обработки.

Далее происходит формирование последовательности технологических переходов, состоящей из создания технологического перехода, определения типа перехода, выбора инструмента, расчета режимов резания.

На завершающем этапе работы программного обеспечения происходит формирование карт эскизов в системе автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС-3D, дальнейшее преобразование карт эскизов в формат bmp и экспорт технологической документации в формат Microsoft Office Excel.

Для работы с созданным программным обеспечением необходимы следующие программы сторонних разработчиков: операционная система Microsoft Windows XP, Microsoft Office Excel 2003, АСКОН КОМПАС-График V8, Сервер СУБД Firebird 2.0.

Главное окно программы представлено на рис. 2. Данное программное обеспечение позволяет задать деталь типа "Втулка" или "Вал" и автоматически сформировать технологическую документацию. В окне состава детали отображаются созданные пользователем

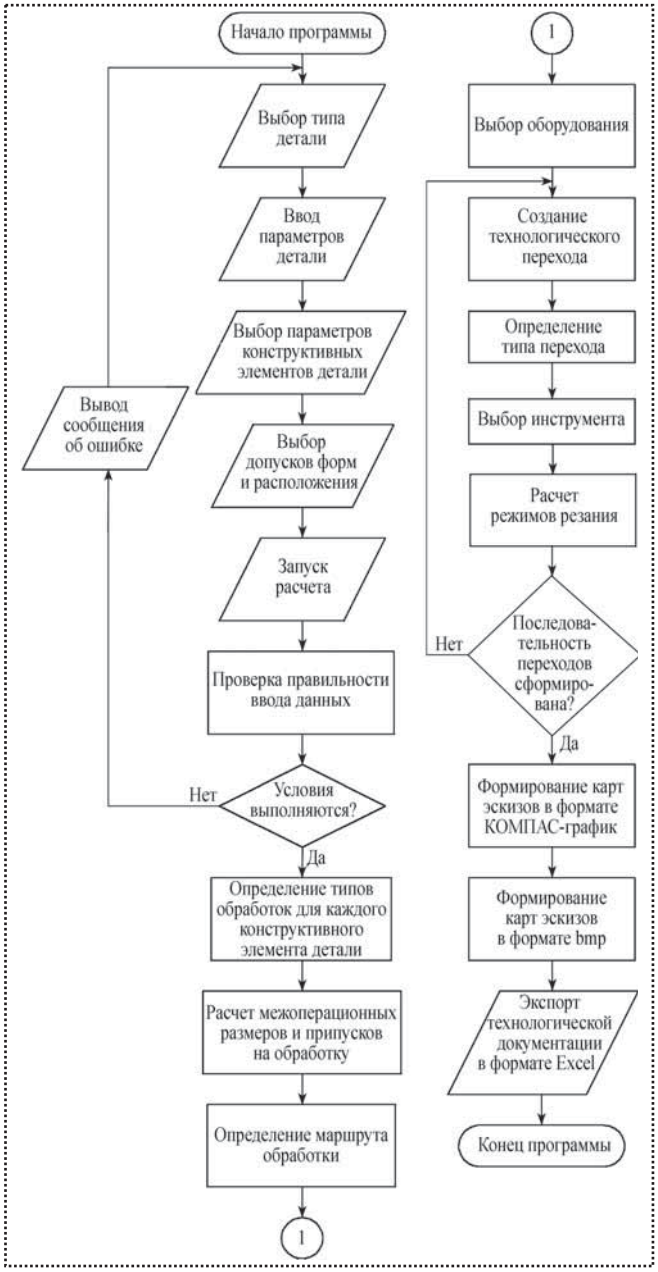



**Рис. 1. Алгоритм работы программы**

конструктивные элементы детали. Кнопками "+", "–", "Редактировать" конструктивные элементы добавляются, удаляются, редактируются соответственно. Кнопкой "Параметры детали" вызывается форма редактирования параметров детали. Через главное меню программы доступно создание новой детали, открытие указанной пользователем детали, сохранение детали, информация о программе. При нажатии на кнопку "Расчет" производится автоматический расчет технологического процесса, вызывается форма с результатами расчета и формируется технологическая документация.

Для начала работы с программой необходимо выбрать пункт меню "Новая деталь" и выбрать тип детали: "Втулка" или "Вал" (рис. 3). Главная форма программы будет отображаться в соответствии с выбранным типом детали (рис. 4).

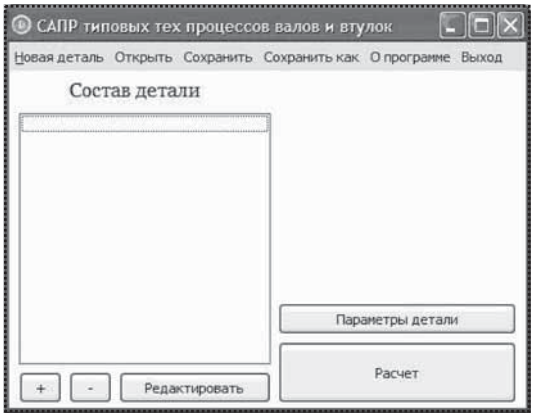



**Рис. 2. Главное окно программы**

**Рис. 3. Выбор типа детали**

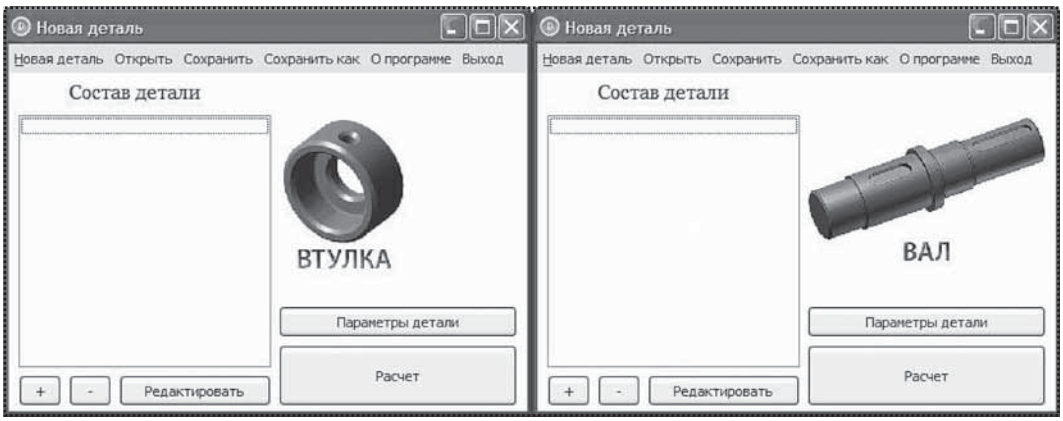



**Рис. 4. Редактирование втулки или вала**

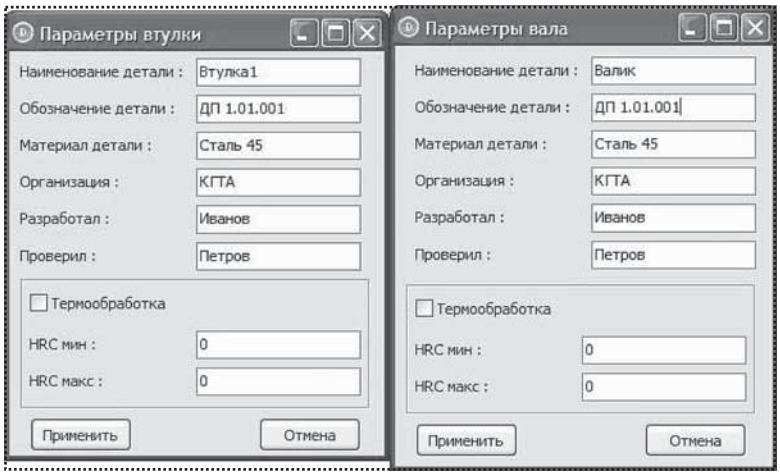



**Рис. 5. Форма редактирования параметров детали**

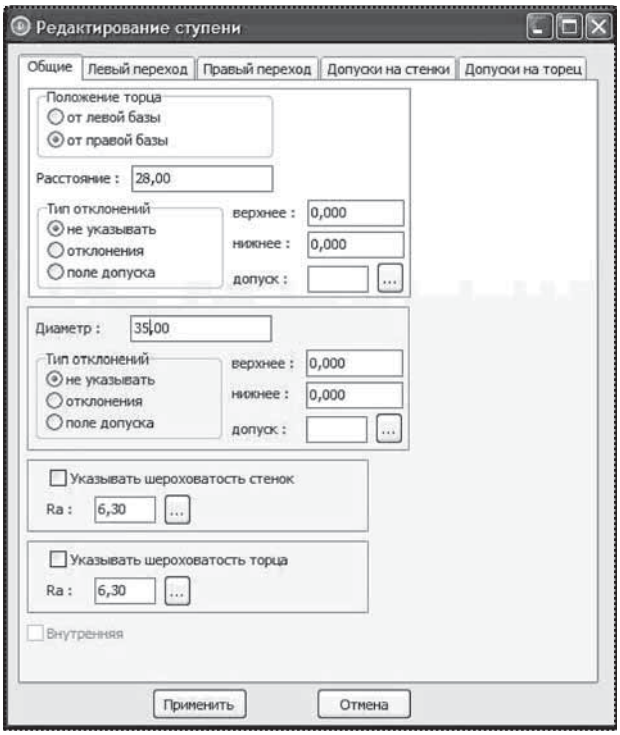



**Рис. 6. Форма редактирования ступени – общие параметры**

При нажатии на кнопку "Параметры детали" главной формы вызывается форма редактирования параметров детали (рис. 5). На ней доступны свойства детали, а также свойства, необходимые для заполнения технологической документации. Сделанные в параметрах детали изменения можно применить (кнопка "Применить") или отменить (кнопка "Отменить").

При выборе ступени в составе конструктивных элементов детали и нажатии кнопки "Редактировать" главного окна программы вызывается форма редактирования ступени (рис. 6). На форме расположено несколько страниц со свойствами ступени детали, расположенными по категориям: общие, левый переход, правый переход, допуски на стенки, допуски на торец. Сделанные в параметрах элемента изменения можно применить (кнопка "Применить") или отменить (кнопка "Отменить"). Кроме этого, возможно осуществлять задание шпоночного паза, отверстий и других конструктивных элементов.

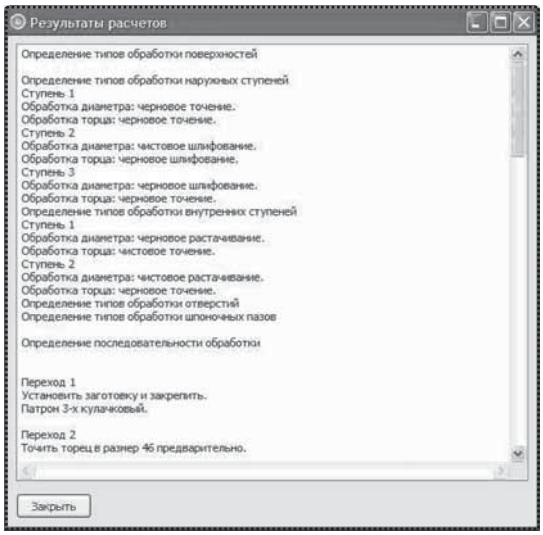



**Рис. 7. Форма с результатами расчета**

При нажатии кнопки "Расчет" главной формы производится расчет технологического процесса и отображается форма с результатами расчета (рис. 7). На форме отображается процесс расчета технологического процесса с разделением на этапы работы программного средства. После проведения расчета осуществляется автоматическая передача данных в MS Excel с построением комплекта технологических документов на изготовление детали, таких как титульный лист, маршрутная, операционная карты, карта эскизов и т.д.

## Вывод

*Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять автоматизированное формирование типовых технологических процессов на механическую обработку деталей тел вращения, что позволяет значительно сократить трудоемкость работы инженера-технолога.*

## Библиографический список

1. **Норенков И.П.** Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. М.: МГТУ им. Баумана, 2002. 336 с.

2. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. / А.Г. Косилова и др.; под общ. ред. А.Г. Косиловой. М.: Машиностроение, 1986.

# MITEX–2011

Московская международная выставка инструментов MITEX проходила в ЦВК "Экспоцентр" с 8 по 11 ноября 2011 г. На ней были представлены ведущие мировые и российские марки электро- и бензиноинструментов, слесарно-сборочного инструмента, абразивы, крепеж, электрогенераторы и т.п. Следует отметить, что большинство экспонатов, демонстрировавшихся на выставке, и предложений фирм-разработчиков – оборудование зарубежного производства. Приведем краткое описание предложений фирм-разработчиков и сбытовых организаций, вызвавших наибольший интерес у специалистов.

**ОАО "Белгородский абразивный завод",** крупнейший в России производитель гибкого абразивного инструмента, демонстрировал на выставке свою продукцию, в том числе и для сборочного производства.

*Ленты для узколенточных шлифовальных машин.* Абразивные материалы лент: электрокорунд, карбид кремния, циркониевый электрокорунд, керамический корунд. Основа лент – хлопчатобумажная ткань, полиэстер и бумага. Размеры лент: ширина 6...500 мм, длина от 115 мм. Зернистость 80-Н-М40 по ГОСТ 3647–80. Такие ленты применяются для абразивной обработки различных материалов на узколенточных шлифовальных станках. Качество обработки поверхности и стойкость шлифовальной ленты зависят от правильности подбора зернистости шлифовальной шкурки, из которой изготовлена лента и от конструкции шва шлифовальной ленты.

*Ленты для широколенточных шлифовальных станков.* Абразивный материал лент – электрокорунд и карбид кремния. Его основа – полиэстер, плотная бумага, ткань комбинированная. Ширина ленты 500...3100 мм, зернистость 80-Н-М28 по ГОСТ 3647–80. Ленты применяются для абразивной обработки на широколенточных шлифовальных станках в металлургической промышленности, машиностроении и при деревообработке. Особенностью таких лент является то, что их ширина больше ширины основы шлифовальной шкурки, из которой они изготовлены.

*Круги лепестковые* для зачистки криволинейных поверхностей от окалины и ржавчины, для шлифования и полирования изделий из металлов, дерева, пластмассы и других материалов. Основа кругов – хлопчатобумажная ткань и полиэстер. Абразивные материалы: электрокорунд, карбид кремния, циркониевый корунд. Зернистость кругов 50-Н-М40 по ГОСТ 3647–80. Наружный диаметр кругов 90...4000 мм, диаметр посадочного отверстия 12...127 мм, высота 30...100 мм.

*Лепестковые шлифовальные круги с оправкой* для шлифования и полирования труднодоступных поверхностей, снятия заусенцев в отверстиях, удаления окалины и ржавчины. Круги применяются на ручных, пневмо- и электромашинках при обработке профильных поверхностей пресс-форм, штампов, в инструментальном производстве для обработки внутренних поверхностей и отверстий при изготовлении и ремонте корпусных деталей, сварных металлоконструкций и емкостей. Основа шлифовальных кругов – хлопчатобумажная ткань или полиэстер. Абразивные материалы: электрокорунд, карбид кремния, циркониевый корунд. Такие круги применяются для шлифования всех видов высоколегированных сталей, твердых цветных металлов, термостойких, коррозионно-стойких и закаленных сталей, низколегированных сталей, цветных металлов, сплавов, древесины, пластмассы, кожи и стекла. Круги можно использовать на пневматических и электрических промышленных шлифовальных машинках. Диаметр кругов 50, 60 и 80 мм, высота 20, 30, 40 и 50 мм. Их зернистость по ГОСТ 3647–80 составляет 50-Н-М50, допустимая частота вращения при их работе 9600...15 300 мин$^{-1}$.

*Круги шлифовальные лепестковые торцевые* для торцевого и плоского шлифования, обработки кромок и сварных швов деталей и конструкций из различных марок сталей и цветных металлов.

*Шлифовальные круги типа КЛТ-3.* Основным отличием таких кругов от других типов торцевых лепестковых кругов является наличие парных лепестков – основного и вспомогательного. За счет увеличения площади соприкосновения вспомогательного лепестка с поверхностью обрабатываемого изделия увеличивается съем обрабатываемого материала в единицу времени.

*Листы шлифовальные* для обдирочных работ, черновой и чистовой обработки, полирования изделий из металлов, сплавов, дерева, пластмассы и других материалов. Основа листов – хлопчатобумажная ткань, водостойкая и неводостойкая бумага. Их зернистость 100...М40 по ГОСТ 3647–80. Размеры листов: 115×140 мм; 170×240 мм и 230×280 мм, для паркетно-шлифовальных машин – 240×720 мм.

**Компания "Интерскол" (Россия)** предложила потребителям различный инструмент.

*Перфоратор мод. SDS-Plus П-22/620ЭР* – новейшая разработка, рекомендуемая для профессиональных анкерных работ. Его потребляемая мощность 620 Вт, частота вращения рабочего органа на холостом ходу 0...1100 мин$^{-1}$, частота ударов на холостом ходу 0...5060 ударов/мин, энергия удара 2,2 Дж. Диаметр бурения (сверления): в бетоне 22 мм, в стали 13 мм, в древесине 30 мм. Перфоратор может работать в реверсивном режиме и оснащен предохранительной муфтой. Его масса с кабелем и рукояткой 2,82 кг.

*Перфоратор мод. SDS-Max П-40/1100Э* с виброзащитой, имеющий редуктор типа "масляная ванна". Для защиты двигателя имеется устройство индикации износа угольных щеток. Рукоятка перфоратора оснащена системой гашения вибрации. Потребляемая мощность перфоратора 1,1 кВт, частота вращения на холостом ходу 235...500 мин$^{-1}$, частота ударов на холостом ходу 1350...2870 ударов/мин, энергия удара 2...9,5 Дж, диаметр бурения (сверления): буром 40 мм, колонкой 105 мм. Масса перфоратора с кабелем и рукояткой 6,2 кг.

*Сверла по металлу* для сверления легированной и углеродистой стали с пределом прочности до 900 Н/мм$^2$, стального литья, серого чугуна, металлокерамических сплавов, ковкого чугуна, цветных металлов и твердых пластмасс. Угол заточек сверла 135°. Титан-нитридное покрытие увеличивает срок службы сверл и позволяет дальше сохранить режущие кромки. Сверла могут быть использованы в различных дрелях и перфораторах со сверлильным патроном для сверления отверстий диаметром 3...16 мм.

*Аккумуляторная дрель-шуруповерт мод. ДА-10/10,8ЭР* пистолетного типа с литий-ионным аккумулятором. Питающее напряжение дрели 10,8 В, максимальный диаметр шурупов 5 мм, частота вращения 600 мин$^{-1}$, максимальный крутящий момент 10 Н·м. Максимальный диаметр сверления: в металле 10 мм, в древесине 16 мм. Работает дрель в реверсном режиме. Емкость аккумулятор-

ной батареи 1,3 А·ч. Дрель-шуруповерт имеет низкий саморазряд, отличный баланс мощности двигателя и емкости аккумулятора. Имеется устройство защиты от перегрева и перегрузки.

*Эксцентриковая шлифовальная машина мод. ЭШМ-150/600Э* для шлифования разнообразных материалов и формы их поверхности. Эксцентриковое и вращательное движение тарелки машины обеспечивает чистую поверхность. Диаметр рабочей тарелки (150 мм) позволяет быстро обрабатывать большую поверхность. Электронная регулировка скорости позволяет обрабатывать самые разнообразные материалы. Мощность, потребляемая машиной, – 600 Вт, частота вращения рабочей тарелки 2500...6500 мин$^{-1}$. Частота колебаний при работе 5000...13 000 колебаний/мин, эксцентриситет 5 мм. Масса машины 2,4 кг.

*Электрорубанок мод. Р-110-01* с увеличенной шириной строгания и возможностью стационарной установки. Мощность, потребляемая электрорубанком, – 1,1 кВт, глубина строгания – до 3 мм, ширина строгания – 110 мм. Его масса 4 кг.

*Лобзик мод. МП-120/750Э* с безинструментным креплением пилок, двигателем мощностью 750 Вт и глубиной пиления до 120 м. Ручка – "грибок" – облегчает пропиливание криволинейных траекторий. Металлический корпус редуктора позволяет дольше работать без перерыва. Литая подошва обеспечивает высокую точность пиления. Максимальный пропил при работе лобзика: в дереве 120 мм, алюминии 20 мм, стали 10 мм. Частота двойных ходов в минуту 500...3000. Угол наклона платформы лобзика ±45°, масса – 2,6 кг.

*Ручная электрическая фрезерная машина мод. ФМ-32/1900Э* с мощностью двигателя 1,9 кВт и набором необходимой оснастки для различных работ. Машина оснащена регулятором скорости и адаптером пылеудаления. Частота вращения фрезы 9000...26 000 мин$^{-1}$, ее диаметр – до 32 мм. Вертикальный ход фрезы – 40 мм. Масса машины – 5,2 кг.

**Компания GTOOL GROUP (Москва)** демонстрировала на выставке станки для корончатого сверления, пневматический инструмент и средства для очистки, полировки и защиты металлических поверхностей.

*Сверлильный станок мод. G-POWER R100* (рис. 1), осуществляющий сверление с применением корончатых и спиральных сверл в цеховых условиях и при сборке на монтажной площадке. Максимальные диаметры сверл: корончатого – 100 мм, спирального – 32 мм. Прижимная сила магнита – 23 кН, частота вращения сверла – 60...140 и 200...470 мин$^{-1}$, мощность двигателя – 1,8 кВт, глубина сверления – 50 мм. Габаритные размеры станка с максимально поднятым приводом 300×200×690 мм, масса – 21 кг. Размеры магнитной плиты 95×200 мм.

*Ленточный напильник мод. G-FIR290* (рис. 2) с частотой вращения рабочего органа 12 000 мин$^{-1}$, размер рабочей ленты 30×540 мм. Потребление воздуха при работе напильника 0,33 м$^3$/мин. Его длина 380 мм, масса 0,2 кг.

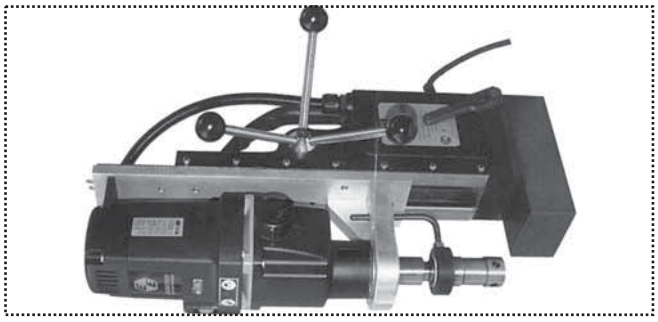


**Рис. 1. Сверлильный станок мод. G-POWER R100**

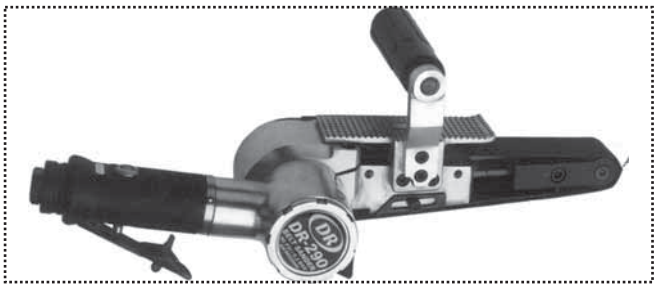



**Рис. 2. Ленточный напильник мод. G-AIR290**

*Масло для ухода за коррозионно-стойкой сталью* удаляет легкие загрязнения, образует водоотталкивающий слой, поверхность становится чистой и блестящей. Его можно использовать для коррозионно-стойких поверхностей, хрома, меди, анодированного и эмалированного металла. Масло не рекомендуется распылять на горячую поверхность и применять при прямых солнечных лучах.

*Очиститель поверхностной ржавчины и окислов* убирает следы от сварки, неглубокую поверхностную ржавчину с хромированных, лакированных, металлических поверхностей. Очиститель распыляют и через 5...10 мин поверхность насухо протирают губкой.

*Шлифовальная абразивная паста* для металлических, хромированных, лакированных поверхностей и хромированного пластика удаляет легкую ржавчину, окисление, побежалость от сварки, пятна от краски, вкрапления от тормозных колодок. Применяется для финишной полировки и удаления микроцарапин.

**Компания OMBRA (Москва)** предложила зарубежный инструмент, по словам представителей компании изготовленный с учетом требований российского потребителя.

*Универсальные наборы инструментов* с числом инструментов 23...131 шт.

*Приводы* – трещеточные рукоятки, карданные шарниры, воротки, изготовленные из легированной хромованадиевой стали по технологии, позволяющей при использовании прилагать нагрузки, превышающие предельно допустимые для рабочего инструмента на 30...50 %. Зеркальное хромоникелевое покрытие придает инструменту красивый вид и облегчает удаление загрязнений после работы. Трещеточные рукоятки с храповым колесом в 72 зубца обеспечивают 5° свободного хода и увеличенное пятно контакта храпового механизма, гарантируют большой запас прочности при высоком моменте, который можно развить с применением двухкомпонентной рукоятки. Устройство быстрого сброса обеспечивает легкую смену и надежно фиксирует оснастку на приводе.

*Отвертки,* снабженные композитными бензомаслостойкими рукоятками, обеспечивающими надежный захват инструмента при работе за счет правильного сочетания мягкой и твердой частей элемента. Стержни отверток, закрепленные в рукоятке с особой прочностью, выполнены из хромованадиевой стали, их рабочие части закалены до высокой твердости и намагничены.

*Торцевые Г-образные ключи* с увеличенной длинной частью обеспечивают доступ к крепежу в ограниченном рабочем пространстве. Ключи изготовлены из легированной хромованадиевой стали по технологии, позволяющей при эксплуатации прилагать высокие нагрузки. Размеры торцевых Г-образных шестигранных силовых ключей – 12, 14, 17, 19, 22 мм.

*Шарнирно-губцевые инструменты* (пассатижи, бокорезы, длинногубцы, щипцы для стопорных колец, кусачки, клещи переставные, ножницы по металлу и т.п.) снабженные резинополимерными двухкомпонентными рукоятками, устойчивыми к воздействию органических растворителей и нефтепродуктов,

гарантирующими защиту рук при работе и позволяющими надежно удерживать обрабатываемые детали. Индукционно закаленные рабочие поверхности и покрытый твердым хромом соединительный элемент обеспечивают длительный срок службы инструмента за счет повышенной износостойкости.

*Инструмент специального назначения* (молотки, баллонные и свечные ключи, фильтросъемники, гибкие захваты, чашки для демонтажа масляных фильтров, плунжерные рычажные шприцы для консистентных смазок с гибким шлангом и т.п.) для обслуживания автомототехники, облегчающие работу в том числе и в труднодоступных местах.

**Торговая компания JET (США)** предложила на российский рынок станки, соответствующие стандартам Российской Федерации, они также сертифицированы в Европе и соответствуют американским нормам (ANSI) для деревообработки.

*Форматно-раскроечный станок мод. JTSS-1500* состоит из удлиненного рабочего стола размером 800×550 мм, параллельного упора, съемного стола (каретки) размером 500×500 мм, регулируемого упора для пиления под углом, подрезного диска диаметром 80 или 20 мм и пильного диска диаметром 315 или 30 мм с 48 зубьями. Пиление осуществляется без изломов краев материала за счет подрезного устройства. Подвижной рабочий стол (каретка) изготовлен из дюралюминиевого профиля и способен выдерживать большие нагрузки. Потребляемая мощность двигателя станка 4,8 кВт. Частота вращения: пильного диска 4000 мин$^{-1}$, подрезного диска – 8000 мин$^{-1}$. Ход подвижного стола 1750 мм. Максимальные: длина распила – 1650 мм, высота пропила под углом 90 и 45° – 102 и 81 мм соответственно. Габаритные размеры станка 1700×3500×1115 мм, масса 403 кг.

*Рейсмусовый станок мод. JWP-2510* (рис. 3) состоит из строгального вала, десяти запасных четырехгранных ножей, десяти винтов под отвертку, вытяжного патрубка и адаптера для вытяжного штуцера с диаметром до 127 мм. Станок осуществляет строгание шириной 635 мм. Благодаря спиральному расположению ножей и оптимально подобранному углу захода в заготовку не происходит удара о поверхность детали, поэтому ножи гораздо дольше остаются острыми, а также снижается уровень шума при рабочем процессе. Встроенная система цифровой индикации и управления обеспечивает регулировку стола по высоте по десяти заданным программам. Прочная чугунная конструкция станка обеспечивает его устойчивость, минимальные вибрации и точность обработки. Мощность, потребляемая станком, – 11 кВт. Число рабочих ножей станка 174 шт., их размер 15×15×2,5 мм, частота вращения строгального вала 5000 мин$^{-1}$. Диаметры: ножевого вала 86 мм, входного вала – 76 мм, выходного вала – 65 мм (2 шт.). Мощность двигателя подъема стола 0,37 кВт. Габаритные размеры станка 1320×915×1500 мм, масса – 725 кг.

*Фрезерный станок мод. JWS-34KX* конструктивно состоит из шпинделя, цанговых зажимов на 8 и 12 мм, бокового и верхнего прижимных устройств, точно регулируемого упора для обрабатываемой заготовки, пластикового защитного кожуха для концевых фрез, упора для фрезерования под различными углами. Отшлифованный и отполированный рабочий стол изготовлен из серого чугуна. Регулировка шпинделя по высоте осуществляется маховиком. Имеется возможность установки каретки с упором для фрезерования под различными углами. Мощность, потребляемая станком, – 2,6 кВт при напряжении в сети 220 В. Частота вращения шпинделя 1700, 3500, 6000, 8000 мин$^{-1}$. Диаметр шпинделя станка 30 мм, его подъем 80 мм. Размеры рабочего стола 540×635 мм. Габаритные размеры станка 640×635×990 мм.

*Двухбарабанный шлифовальный станок мод. DDS-237* имеет прочную конструкцию, правильное сочетание частоты вращения барабанов и движения транспортной ленты привода подачи заготовки (2...3 м/мин), что позволяет за один проход заготовки через станок шлифовать до 1,5 мм поверхности по всей ширине. На станке обрабатывают заготовки шириной до 940 мм с точностью до 0,2 мм по всей ширине. Точная регулировка высоты второго барабана в зависимости от разности зернистости шлифовальной ленты, используемой при обработке деталей, позволяет четко увеличить уровень шлифования и получать высокое качество отшлифованной поверхности на выходе станка. Покрытие барабанов тонким слоем резины обеспечивает хорошую плотность прилегания шлифованной ленты к барабану, что позволяет использовать ленты без приклеивания к поверхности, накрутив на барабан и закрепив ленту только по краям барабана. Два вытяжных штуцера обеспечивают большой объем вытяжки пыли. Мощность потребляемая станком – 1,1 кВт, частота вращения шлифовального барабана 1400 мин$^{-1}$, мощность подающего устройства 0,2 кВт при скорости подачи до 3 м/мин. Габаритные размеры станка 1090×1420×1090 мм, масса – 440 кг.

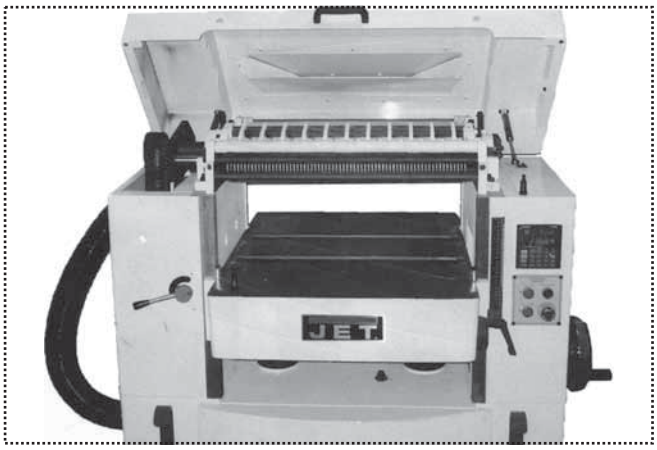



**Рис. 3. Рейсмусовый станок мод. JWP-2510 в открытом виде**

**ПТК-Инжиниринг (С.-Петербург)** предложила потребителям новые зарубежные разработки: технологии и промышленное оборудование для термической резки и сварки.

*Технологию OFC газокислородной резки,* основанную на экзотермической реакции сгорания железа в среде чистого кислорода. При этом разрезаемый металл в точке начала резки сначала нагревается подогревающим пламенем до температуры воспламенения, после чего осуществляется подача чистого кислорода и начинается процесс резки. Осуществление газокислородной резки возможно при условии, что разрезаемый металл обладает следующими свойствами: температура плавления металла выше температуры воспламенения в чистом кислороде (иначе металл будет плавиться без сгорания); температура плавления окислов металла ниже температуры плавления самого металла (иначе окислы не будут расплавляться и их невозможно будет удалить из зоны реза); оксиды металла должны иметь достаточную жидкотекучесть для выдувания их кислородной струей из зоны реза; теплопроводность металла не должна быть достаточно велика, чтобы не препятствовать концентрации тепла в зоне резки; количество тепла, выделяющееся при сгорании металла в кислороде, должно быть достаточно для поддержания непрерывного процесса резки. Технология осуществляется инжекторными резаками, трехтрубными резаками с внутрисопловым и внутриголовочным смешением.

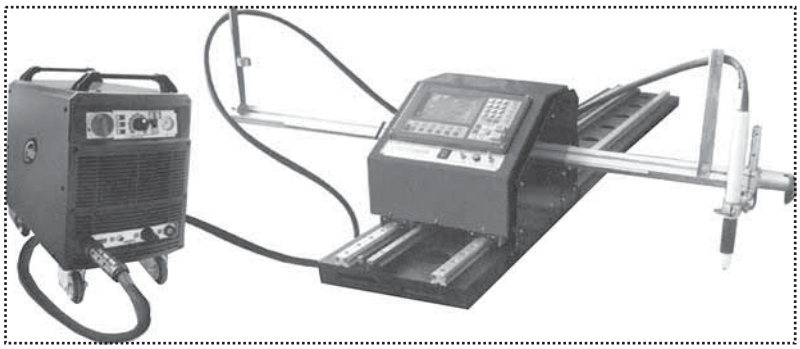


**Рис. 4. Источник питания для механизированной плазменной резки мод. P-Tronic 120 AUTO**

*Источник питания для механизированной плазменной резки мод. P-Tromic 120 AUTO* (рис. 4) для механизированной и автоматизированной резки углеродистых, легированных и коррозионно-стойких сталей, меди, алюминия и других цветных металлов. Плазмообразующий газ – воздух. Режимы резки: резка с зазором, резка с опорой сопла, образование канавок. Источник оснащен: встроенным интерфейсом для подключения ЧПУ и блоком контроля высоты резки; устройством точной установки тока резки и расхода воздуха; манометром для контроля давления воздуха. Питающее напряжение источника питания 400 В, потребляемая мощность 23 кВт, давление сжатого воздуха 4,5...6 МПа. Толщина резки для низкоуглеродистой стали: качественная резка 22 мм, разделительная резка 30 мм, резка от края детали 40 мм. Габаритные размеры источника питания 340×570×610 мм, его масса 39 кг.

*Переносная машина мод. КС-5* для выполнения прямолинейных резов на листовых конструкциях в стесненных условиях, в том числе в вертикальном положении. Вид резки – газокислородная, горючий газ ацетилен/пропан. Машина перемещается по жесткому направляющему рельсу с магнитным креплением, привод перемещения электрический, число режущих горелок – 1 шт., толщина резки – 6...100 мм. На машине выполняется разделительная резка под любым углом со скоростью до 400 мм/мин. Питающее напряжение машины 220 В, габаритные размеры 740 (включая рельс)×800×400 мм, масса 5,9 кг.

*Машина для фигурной термической резки труб с ЧПУ* выполняет: косые резы концов труб; криволинейные резы концов труб (резку патрубков); резку секций для секционных отводов; вырезку центровых отверстий для патрубков; резку труб квадратного сечения. Система ЧПУ позволяет разрабатывать программы резки на стойке управления машиной или с удаленной передачей данных. Машина может быть дополнена высокопроизводительным источником питания для плазменной резки.

*Самоходный автомат тракторного типа мод. VZC-P3* для сварки под флюсом стыковых, нахлесточных и тавровых швов внутри и вне колеи. Технология, двухпроволочной сварки Tandem осуществляется с использованием двух источников питания – постоянного и переменного тока. Источники питания: постоянного тока – стандартный инверторный источник питания серии Evo SAW; переменного тока – сварочный трансформатор Evo AC1200. Возможности сварки: сварка под флюсом одной проволокой диаметром 1,6 и 2,0 мм; сварка под флюсом одной проволокой диаметром 3,0 мм; сварка под флюсом двумя проволоками диаметром 1,6 и 2,0 мм. Возможности источника питания постоянного тока: сварка под флюсом, ручная сварка штучным электродом. Все виды сварки осуществляются с высокой нагрузкой ПВ 100 %. На работу автомата почти не влияют колебания напряжения питания, имеется устройство защиты от перегрева и короткого замыкания. Управление осуществляется с точным заданием сварочных параметров. Питающее напряжение автомата 380 В, потребляемая мощность 103 кВт, потребляемый ток 286 А, напряжение сварочной дуги 44 В, ток сварки 200...500, 450...850, 800...1200 А. Габаритные размеры автомата 974×564×1360 мм, масса 700 кг.

*Специальный инструмент для заточки вольфрамовых электродов.* Правильная заточка вольфрамового электрода – один из важнейших факторов качественной сварки при сборочных работах. Неправильная или некачественная заточка приводит к повышенному нагреву околошовной зоны, перегреву электрода и уменьшению его срока службы, появлению более широкой зоны цветов побежалости. При правильной заточке дуга более концентрированная, ее давление больше и обеспечивает лучшее проплавление металла при более узкой околошовной зоне. Угол заточки электродов 15...180° позволяет сварщику подобрать оптимальную геометрию электрода для разных материалов и разного рода тока сварки. Минимальная длина обрабатываемого электрода – 15 мм, что позволяет затачивать электроды для головок орбитальной сварки. При каждой заточке стачивание электрода составляет всего 0,3 мм. Питающее напряжение инструмента 230 В, потребляемая мощность 900 Вт. Материал заточного диска – алмаз, его диаметр 40 мм, частота вращения диска 11 500...27 000 мин$^{-1}$. Диаметр затачиваемых электродов 1,0; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0 мм. Инструмент состоит: из заточной головки с приводом – держателем электродов и зажимных цанг. Масса инструмента 2,8 кг.

Прошедшая выставка была местом встречи производителей, поставщиков и потребителей инструментальной и другой продукции, в том числе для сборочных работ. В рамках выставки была организована конференция "Российский рынок электроинструмента – состояние и перспективы".

Чл.-кор. Академии проблем качества **А.Н. Иванов**

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 22.02.12 г. Подписано в печать 13.04.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,87. Заказ 142. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.